Prof. Inż. J. Szowheniw

SILNIKI WIETRZNE

Wydawnictwo Polskiego Komitetu
Energetycznego

WARSZAWA, 1932.
Skład Główny w Księgarni Technicznej,
Przeglądu Technicznego

Prof. Inż. J. Szowheniw

SILNIKI WIETRZNE

Wydawnictwo Polskiego Komitetu
Energetycznego

WARSZAWA, 1932.
Skład Główny w Księgarni Technicznej,
Przeglądu Technicznego

Drukarnia Techniczna, Sp. Akc., Warszawa, ul. Czackiego 3—5, tel. 614-67.

OD WYDAWCY.

Zagadnienie zamiany energji wiatru na mechaniczną i zużytkowania jej w drobnym przemyśle miało, szczególniej w niektórych krajach, duże znaczenie. Dziś, w związku z rozwojem elektryfikacji, kiedy energja elektryczna stara się przeniknąć do najbardziej odległych miejscowości, znaczenie energji wiatru niewątpliwie zmalało, a w związku z tem obserwowane jest na Zachodzie zjawisko zmniejszania się ilości wiatraków. Nie zmieniają tego obrazu podjęte ostatnio próby wyzyskania wiatrów górnych, mających dostarczyć pokaźnych ilości energji. Silnik elektryczny okazał się zwycięskim rywalem silnika wietrznego.

W warunkach polskich sprawa zastąpienia wiatraka w małym młynie wiejskim, w cegielni, ogrodzie przemysłowym i t. p. przedstawia się naczej. Niestety, możność objęcia elektrycznemi sieciami odległych od ośrodków przemysłowych wsi i miasteczek nie wydaje się tak bliską i zapewne długi jest jeszcze okres czasu, szczególniej w województwach wschodnich, do chwili, gdy czerpanie prądu z elektrowni publicznych będzie dla wszystkich dostępne; dzięki temu spożywca energji jeszcze długo będzie zmuszony wytwarzać ją na miejscu, między innemi, i przy pomocy wiatraków.

Wobec dużego zacofania, jakie widzimy u nas w konstrukcji silników wietrznych, wobec panującej w tej dziedzinie rutyny, wywołanej brakiem wiadomości o tem, jak współczesny silnik wietrzny budowany być powinien, i wobec znaczenia, jakie ma i długo jeszcze mieć będzie wiatrak w naszych warunkach, Polski Komitet Energetyczny zajął się tem zagadnieniem. Dzięki pomocy materjalnej Ministerstwa Rolnictwa, zostały przedewszystkiem opracowane dane statystyczne co do wiatrów dolnych w Polsce, ogłoszone w „Sprawozdaniach i Pracach P. K. En." w roku 1930, a niniejsze wydawnictwo ma na celu zapoznać z podstawami

teoretycznemi, konstrukcją i zastosowaniem współczesnych silników wietrznych.

Podręcznik ten przeznaczony jest dla tych, którzy interesują się wyzyskaniem energji wiatru, dla tych, którzy już posiadają lub wznieść zamierzają wiatraki dla siebie, i wreszcie dla tych, którzy budową ich się zajmują.

Z takiego przeznaczenia wynika i dobór treści, która obok statystyki polskiej ujmuje zwięzłe podstawy teorji, podane w przystępnej formie, oraz opisy konstrukcji i zastosowania. Dział elektryczny urządzeń wiatrakowych ujęty został tylko ogólnie, informacyjnie, z tej przyczyny, że stanowi to dziedzinę specjalną.

Oddając w ten sposób ujętą pracę do rąk czytelników, interesujących się zagadnieniem wyzyskania energji wiatru do celów technicznych, mamy nadzieję, że przyczynimy się do lepszego zrozumienia roli wiatraka i do oparcia jego konstrukcji na współczesnych zasadach.

POLSKI KOMITET ENERGETYCZNY.

SPIS RZECZY

Wstęp,

Źródła energji 1
Jednostki energji 1
Zasoby energji świata 2
Zasoby energji w Polsce 4

Rozdział I.

O wiatrach.

Przyczyny powstawania wiatru 5
Wiatry dolne 6
Skala siły wiatru 7
Kierunki wiatrów 7
Przyrządy do wyznaczania kierunku i szybkości wiatru 8
Podział wiatrów zależnie od szybkości 9
Statystyka wiatrów w Polsce 11
Wykresy długości okresów trwania wiatrów 17
Energja wiatru 19

Rozdział II.

Zasady wykorzystania energji wiatru:

Pojęcia zasadnicze 21
Zasady pracy skrzydeł wiatraka 22
Stopień wyzyskania energji wiatru 25
Rozkład siły naporu wiatru na skrzydło 28
Spółczynniki aerodynamiczne 29
Wyzyskanie siły oporu do napędu wiatraka 31
Praca skrzydeł pod działaniem siły nośnej 33
Sprawność skrzydła 37
Spółczynnik momentu 38

Rozdział III.

Doświadczenia z wiatrakami.

Spostrzeżenia prof. P. La Cour'a 40
Badania T. Ch. Sabinina i K. Bilau'a 41
Dane katalogowe 44
Spółczynniki wyzyskania energji wiatru 47
Rozporządzalna energja użyteczna wiatru 48
Tunele aerodynamiczne 52
Prawo podobieństwa 57

Rozdział IV.

Wiatraki wiejskie.

Przegląd historyczny i podział silników wietrznych 59
Wiatraki wiejskie o budowie stojakowej typ niemiecki) 62
Wiatraki typu holenderskiego 65
Wady wiatraków wiejskich 66
Wiatraki wiejskie udoskonalone 68

Rozdział V.

Silniki wietrzne nowoczesne.

Wiatraki czteroskrzydłowe „Mammuth" 83
Turbiny wietrzne 84
Wiatraki szybkobieżne 93
Silnik żaglowy Durand'a 95
Silniki wietrzne uruchamiane siłą oporu czołowego 96
Zjawisko Magnusa 103
Silnik Flettner'a 104
Silnik Savonius'a 106
Wieże 107
Wyzyskanie wiatrów górnych 115

Rozdział VI.

Zastosowanie silników wietrznych.

Urządzenia wodociągowe 118
Odwadnianie i nawadnianie gruntów 128
Zastosowanie wiatraków do zalewania stawów rybnych 144
Zastosowanie wiatraków w młynarstwie oraz do napędu maszyn rolniczych 149
Zastosowanie silników wietrznych w różnych gałęziach przemysłu 151
Zastosowanie silników wietrznych do wytwarzania energji elektrycznej. 156

Rozdział VII.

Projektowanie silników wietrznych.

Kwestjonarjusz do projektu wykorzystania energji wiatru . . . 166
Obliczenia wstępne 167
Oznaczanie mocy silników do napędu pomp 171
Koszty budowy i eksploatacji urządzeń silnikowych wietrznych 172

Rozdział VIII.

Obszary Polski nadające się do wykorzystania energji wiatru 177

Literatura 181

Wstęp.

Źródła energji.—Jednostki energji.—Zasoby energji świata. Zasoby energji w Polsce.

Ożywione i nieustanne współzawodnictwo różnych krajów w dziedzinie gospodarczej po wojnie znacznie się zwiększyło i przybrało bardziej zaostrzone formy, przyczem specjalną uwagę wszędzie poświęcano najbardziej racjonalnemu i najszerszemu wykorzystywaniu najrozmaitszych źródeł energji.

Źródłami energji, nadającemi się przy współczesnym stanie techniki do praktycznego wykorzystania, są:

1. energja cieplna: węgiel kamienny, drzewo, torf, nafta, łupki bitumiczne i gazy palne;
2. energja spiętrzonej wody;
3. energja przypływów i odpływów morskich;
4. energja cieplna promieni słonecznych.

Do wymienionych źródeł energji należy dodać jeszcze energję wiatru, której wykorzystanie w ciągu ostatnich lat, w związku z wynalezieniem nowych silników wietrznych, a także zastosowaniem ich do wytwarzania prądu elektrycznego, bardzo się rozpowszechniło, zwłaszcza w niektórych krajach (jak Holandja, Danja, Niemcy, Stany Zjednoczone), a to dzięki temu, że, w pewnych warunkach, energja wiatru jest najtańszą, pomimo znacznych kosztów instalacji.

Pod energją mechaniczną rozumieć należy zdolność pewnego układu do wykonania w określonym czasie pracy, którą w technice wyrażamy w t. zw. koniach mechanicznych. Koń mechaniczny, oznaczany symbolem KM, odpowiada pracy 75 kilogramometrów na sekundę.

Do wyrażania mocy w elektrotechnice używany jest kilowat, oznaczany symbolem kW, równający się 102 kilogramometrom na sekundę, czyli 1,36 KM. Odwrotnie 1 KM=0,736 kW.

Każdą inną postać energji można mierzyć temi samemi jednostkami, o ile można ją zamienić na energję mechaniczną.

O ile naprzykład jakiekolwiek paliwo: węgiel, nafta, drzewo i t. d. spala się, to wówczas jedna t. zw. kalorja kilogramowa (Kal)[1]) może wykonać 427 kgm pracy, i odwrotnie —praca mechaniczna 427 kgm może ogrzać 1 kg wody o 1°C.

Ilość energji, którą można otrzymać z różnych rodzajów paliw, zależy od wartości opałowej tego paliwa, t. j. od ilości kaloryj, które paliwo wywiązuje przy spalaniu zupełnem. Dobry węgiel kamienny daje ok. 7000 kaloryj.

Gdyby maszyna mogła zamieniać całkowicie ciepło na energję mechaniczną, bez strat, to jeden kilogram węgla dałby przy spalaniu w przeciągu 1 godziny $7000 \times \frac{427}{75 \times 60 \times 60} =$ = 10,7 KM godz., t. j. silnik o mocy 10,7 KM zużywając 1 kg. węgla, mógłby pracować w przeciągu 1 godziny.

W rzeczywistości jednak ciepło spalania węgla i innych rodzajów paliw wykorzystywane jest przez maszyny współczesne tylko w bardzo małym stopniu, a mianowicie około 10%, tak, że 1 kg paliwa przy spalaniu go w przeciągu godziny daje:

węgiel kamienny	około 1 KM
nafta	od 1 KM do 1,4 KM
węgiel brunatny	$^1/_3$ KM
torf	$^1/_2$ KM
drzewo . .	0,7 KM

Na podstawie wyżej przytoczonego można obliczyć zasoby rozmaitych źródeł energji mechanicznej całego świata. Wyniki takich obliczeń podane są w tablicy 1.

Chociaż przytoczone tu dane nie mogą być uważane za zupełnie ścisłe ze względu na niedostateczność badań w tej dziedzinie, jednakże z tablicy tej widać, że energja wiatru zajmuje drugie miejsce po węglu.

Jak przedstawia się kwestja źródeł energji mechanicznej wogóle, w szczególności zaś energji wiatru na terytorjum Polski?

---

[1]) Kalorją kilogramową (Kal) nazywamy tę ilość ciepła, która zdolna jest ogrzać 1 kg wody o 1 stopień, począwszy od temperatury 14,5°C do 15,5°C.

TABLICA 1.

Zasoby źródeł energji świata, wyrażone w miljardach tonn paliwa wzorcowego o wartości opałowej 7000 Kal/kg.

Nr.	Źródło energji	miljardów tonn	%
1	Węgiel kamienny	5 600	75,1
2	Drzewo	340	4,6
3	Torf zmurszały	215	2,9
4	„ narastający	50	0,7
5	Ropa naftowa	11,5	0,1
6	Słoma	37	0,5
7	Siła wodna	374	5,0
8	Wiatr	826	11,1
	Razem . . .	7 453	100%

Pewne, choć niezupełnie dokładne, dane zawiera praca „Zasoby energji w Polsce i stan ich wyzyskania" wydana w 1927 r. przez Polski Komitet Energetyczny. Mamy mianowicie w Polsce: węgla kamiennego 61,9 miljardów tonn; torfu 1,5 miljarda tonn; drzewa 2,0 miljardy tonn.

W celu otrzymania choćby przybliżonych cyfr co do innych źródeł energji, przyjęto dla tych źródeł energji, które stale się odnawiają, okres eksploatacji 1000 lat i ten tysiącletni zapas energji przeliczono na paliwo wzorcowe.

Ciepło spalania ropy naftowej przyjęto równe 11 000 Kal/kg.
Ciepło spalania węgla brunatnego „ „ 4 000 Kal/kg.

Dla wiatru przyjęto, że z 1 km^2 powierzchni kraju zajętej pod instalacje można otrzymać 20 KM w ciągu 4000 godzin w roku i że instalacje te mogą pokrywać 50% powierzchni kraju.

Przy takich założeniach otrzymujemy:

a) Woda spiętrzona może dać przeciętnie

$$\frac{2\,239\,000+3\,652\,000}{2}=2\,945\,000 \text{ KM}$$

w przeciągu 6000 godzin rocznie, co stanowi 17 670 000 000 KMgodzin. Odpowiada to tejże ilości kilogramów węgla. W okresie 1000 lat wyniosłoby to około 17,5 miljardów tonn paliwa wzorcowego.

b) Zasoby ropy naftowej obliczono na 160 000 000 tonn, czyli 0,16 miljarda tonn. Po przeliczeniu na paliwo wzor-

cowe (7.000 Kal) otrzymujemy $0{,}16 \frac{11\,000}{7\,000} = 0{,}25$ miljarda tonn.

c) Węgla brunatnego wydobywa się obecnie w Polsce bardzo mało, mianowicie 270 000 tonn rocznie. O ile przypuścimy, że wydobycie jego wzrośnie przeciętnie do 1 miljona tonn rocznie, to w ciągu 1000 lat wyniosłoby 1 miljard tonn. Przeliczając na paliwo wzorcowe, otrzymamy węgla brunatnego $1 \times \frac{4\,000}{7\,000} =$ $= 0{,}6$ miljarda tonn.

d) Przy naszych przypuszczeniach wiatr na 386 600 km^2 powierzchni Polski da: 20 KM × 4000 godzin × 386 600 × × 0,50 = 15 464 000 000 KM, co odpowiada około 15 miljardom kilogramów węgla. W ciągu 1000 lat odpowiadałoby to 15 miljardom tonn paliwa wzorcowego.

Na podstawie powyższych obliczeń zestawiono tablicę 2.

TABLICA 2.

Zasoby źródeł energji w Polsce, wyrażone w miljardach tonn paliwa wzorcowego (7000 Kal).

Źródło energji	miljardów tonn	% zasobów ogólnych
Węgiel kamienny . . .	61,9	61,9
Drzewo	2,0	2,0
Torf	1.5	1,5
Ropa naftowa	0,25	0,25
Węgiel brunatny	0,6	0,6
Siła wodna	17,5	17,5
Wiatr	15,0	15,0
Słoma i inne źródła	2,25	2,25
Razem . . .	100	100%

Z powyższego przybliżonego zestawienia wynika, że w Polsce energja wiatru zajmuje trzecie miejsce w szeregu innych źródeł energji, stanowiąc około 15% całkowitego zasobu rozporządzalnych źródeł energji; to też na wykorzystanie energji wiatru należałoby zwrócić szczególną uwagę.

W obecnym czasie wykorzystanie tej naturalnej siły rozwinięte jest w Polsce bardzo słabo, i to przeważnie tylko z pomocą prymitywnych wiatraków, których liczba wynosi 6360[1]).

[1]) „Młynarz Polski" z r. 1930, Nr. 8.

Dopiero w ostatnich czasach zaczęły ukazywać się i u nas silniki wietrzne nowszych typów, jednakże ilość ich jest jeszcze znikoma, nie przewyższająca 50 instalacyj, przeważnie w Poznańskiem i na Pomorzu. Najbardziej rozpowszechnione są silniki wieloskrzydłowe o średnicy od 1,5 do 12 metrów.

Książka niniejsza ma na celu zaznajomienie osób zainteresowanych z zasadniczemi wiadomościami z dziedziny wykorzystania energji wiatru zapomocą silników wietrznych nowszych systemów oraz nakreślenie perspektyw wykorzystania tej energji w poszczególnych dzielnicach Polski.

Ze względu na to, że projektowanie silników wietrznych wykonywane było zazwyczaj przez firmy, które je budują, uważałem za zbyteczne zamieszczanie tutaj rysunków konstrukcyjnych, jak również obliczeń poszczególnych części wiatraków. Podaję więc tylko zasady obliczeń, rysunki typowe i wskazówki niezbędne do zorjentowania się przy wyborze rodzaju silnika wietrznego.

ROZDZIAŁ I.

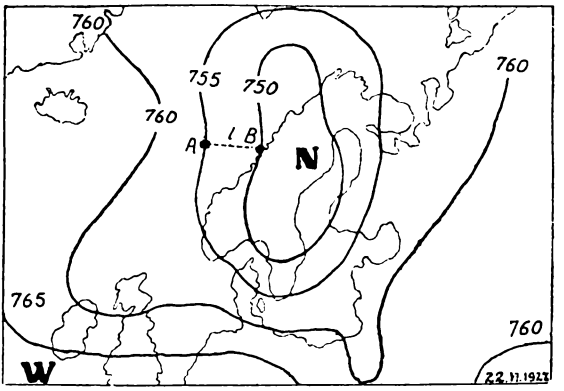
O wiatrach.

Przyczyny powstawania wiatru.—Wiatry dolne.—Skala siły wiatru.—Kierunki wiatrów.—Przyrządy do wyznaczania kierunku i szybkości wiatru.—Podział wiatrów zależnie od szybkości.—Statystyka wiatrów w Polsce. Wykresy długości okresów trwania wiatrów.—Energja wiatru.

1. **Przyczyny powstawania wiatru.** Wiatrem nazywamy wszelki ruch powietrza. W atmosferze ruch ten odnosimy do ziemi, jako podstawy nieruchomej. Energja słoneczna, wypromieniowana na ziemię, podtrzymuje w atmosferze ustawiczny ruch. Przyczyną bezpośrednią wiatru jest różnica ciśnień, panujących w dwu obszarach tego samego poziomu, spowodowana nierównomiernem ogrzaniem powierzchni ziemi; spadek ciśnienia, albo tak zwany gradjent, t. j. różnica ciśnień przypadająca na pewną odległość jest przyczyną powstawania ruchu powietrza. Różnicę ciśnień wyrażamy w mm słupa rtęci. Na odległości 1 km różnica ciśnień wynosi zaledwie ułamek milimetra słupa rtęci, dlatego za jednostkę długości przyjmujemy „średni stopień" geograficznego południka, t. j. około 111 km. Gradjent określa się zatem różnicą ciśnień w milimetrach słupa rtęci na jeden stopień geograficzny odległości w kierunku prostopadłym do linji równych ciśnień (izobar), wykreślonych na mapie (rys. 1).

Na kierunek wiatru oraz na jego siłę ma wpływ, prócz różnicy ciśnień, wiele przyczyn, z których główniejsze są: orografja miejscowości, obrót ziemi naokoło osi, większa lub mniejsza zawartość pary wodnej w powietrzu.

2. **Wiatry dolne.** Ruch wiatru może być zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. Wiatry, które mają gospodarcze znaczenie, a więc które wieją blisko powierzchni ziemi,



Rys. 1.

czyli tak zwane „wiatry dolne", mają zwykle kierunek prawie poziomy.[1])

Prędkość wiatrów dolnych jest przy ziemi najmniejsza. Wraz z oddalaniem się od powierzchni ziemi prędkość wzrasta. Prawo zwiększenia prędkości wiatru ze zwiększeniem oddalenia od powierzchni ziemi można wyrazić następującemi wzorami:

a) W obliczeniach przybliżonych:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{H_1}{H_2} \qquad (1)$$

gdzie H_1 i H_2 — wysokości nad powierzchnią ziemi, a v_1 i v_2 — odpowiednie prędkości.

b) do obliczeń bardziej ścisłych Hellmann podaje taki wzór:

$$v = 1 + 2{,}81 \log (H + 4{,}75) \text{ m/sek} \quad . \quad . \quad (2)$$

Według ostatniego wzoru (2) obliczono, że przy

$H =$ 2; 16; 32; 100; 200; 300; 400 m

prędkość $v =$ 3,33; 4,70; 5,40; 6,70; 7,50; 8,00; 8,30 m/sek.

[1]) Obecnie powstają projekty wykorzystania wiatrów górnych. Patrz H. Honnef. Windkraftwerke. Brunświk 1932.

Pomiary dokonane przez tegoż Hellmann'a w Nauen pod Berlinem dały następujące prędkości przy różnych H:

$H = 0 \quad 5 \quad 10 \quad 15 \quad 25 \quad 30$ m.

Średnia roczna prędkość

$v = 1{,}35, \quad 4{,}05, \quad 4{,}53, \quad 4{,}85, \quad 5{,}15, \quad 5{,}50$ m/sek.*)

3. **Skala siły wiatru.** Siłę wiatru wyznacza się według jego prędkości, wyrażając ją w metrach na sekundę (Rosja), albo w skali 10-stopniowej (była używana w Austrji), albo najczęściej w 12-stopniowej skali Beaufort'a; tę ostatnią skalę podajemy niżej w tablicy 3.

TABLICA 3.

Skala Beaufort'a.

Stopień	Siła wiatru	Prędkość wiatru m/sek
0	Cisza bez wiatru	0
1	Delikatny powiew (dym unosi się prawie prosto w górę)	0,5—2,0
2	Lekki wiatr, dający się już odczuć	3—4
3	Słaby wiatr (poruszający flagi i liście drzew) .	5—6
4	Umiarkowany wiatr (rozwijający flagi, poruszający małe gałęzie)	7
5	Świeży wiatr (porusza większe gałęzie, niemiły w odczuciu)	8—9
6	Silny wiatr (głośno szumiący)	10—11
7	Ostry wiatr (porusza cieńsze pnie drzew, wzbudza na wodzie przewalające się fale) . .	12
8	Gwałtowny wiatr albo wicher (wstrząsa całemi drzewami, wstrzymuje kroczenie przeciw wiatrowi)	13—14
9	Burza (zrywa dachówki, unosi lżejsze przedmioty)	15—16
10	Silna burza (przewraca i łamie drzewa) . . .	18
11	Gwałtowna burza, siejąca zniszczenie	25
12	Orkan (huragan), wszystko niszczący	30 i więcej

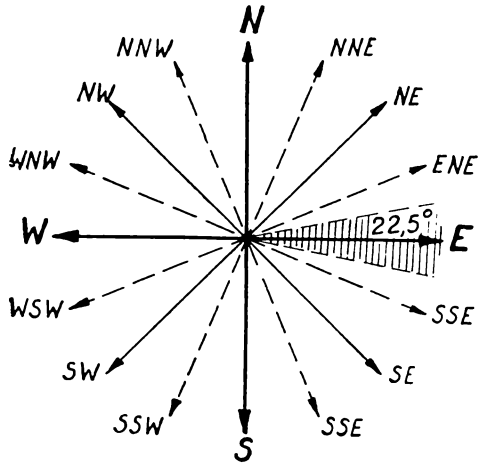
4. **Kierunki wiatrów.** Kierunek wiatru nosi nazwę tej strony świata, skąd wieje, a więc, gdy wiatr wieje z północy, —jest północny i t. d.

Międzynarodowa nomenklatura obejmuje 16 kierunków

*) Grosse dał nowy wzór (Meteorol. Zeitschr. 1917, zesz. 8/9 str. 325):
$v = 1{,}7 + 3{,}4 \log (h + 5)$ m/sek,
albo $v = 2{,}91\ h^{0.19}$ m/sek.

w wycinkach po 22,5°, po każdej stronie przyjętego kierunku wiatru (rys. 2).

Cztery główne kierunki oznacza się wielkiemi literami. *N* — północ, *W* — zachód, *S* — południe i *E* — wschód.

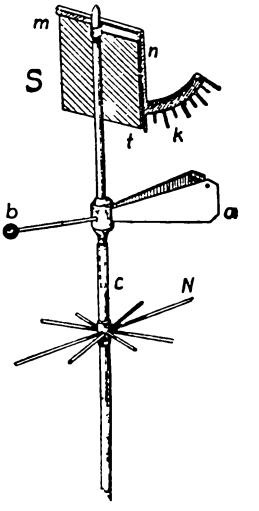


Rys. 2.

Oznaczenia kierunków pośrednich rozpoczynają się od liter *N* i *S* (*NE*, *NW*, *SE*, *SW*); w oktantach zaś na początku pisze się literę tego głównego kierunku, ku któremu kierunek wiatru jest bardziej zbliżony, np. *NNE* — wiatr północno-północno-wschodni; *WSW* — wiatr zachodnio-południowo zachodni.

5. **Przyrządy do wyznaczania kierunku i szybkości wiatru.** Do oznaczania kierunku wiatru służy chorągiewka wiatrowa albo wiatromierz Wilda (rys. 3).

Wiatromierz umieszcza się na wyniosłym punkcie dachu. Właściwą chorągiewkę stanowią dwa skrzydełka (*a*) z blachy, rozchylone o niewielki kąt, zrównoważone ciężarkiem (*b*) o takim momencie, aby skrzydełka mogły się najswobodniej obracać na osi (*c*). Umieszczone nieco niżej pręty metalowe wskazują kierunki stron świata.



Rys. 3.

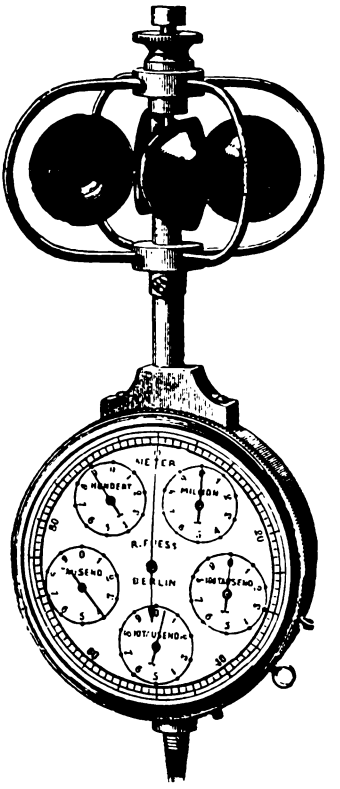
Druga część przyrządu — siłomierz (*S*), służący do mierzenia natężenia (prędkości) wiatru, jest to lekka tabliczka metalowa, np. aluminjowa, zawieszona swobodnie na poziomej osi (*mn*); tabliczka ta, nastawiona przez obrót chorągiewki prostopadle do kierunku wiatru, odchyla się o kąt, zależny od prędkości wiatru. Kąt odczytany na skali (*k*) pozwala obliczyć natężenie wiatru według skali Beaufort'a lub też jego prędkość.

Chorągiewka powinna być umieszczona dość wysoko, aby wiatr mógł swobodnie dąć, nie obijając się o drzewa, budynki

lub kominy. Spostrzeżenia z pomocą chorągiewki należy robić conajmniej trzykrotnie na dobę, a mianowicie: o godz. 7 rano, o godz. 2 i o 9 po południu.

Doskonalszemi przyrządami do mierzenia szybkości wiatru są: a) anemometr Robinsona i b) anemometr skrzydełkowy.

W anemometrze Robinsona (rys. 4) ruch wiatru przejmują cztery półkule miedziane, osadzone na krzyż na poziomych prętach, przymocowanych do osi pionowej. Półkule te obracają się zawsze w jedną stronę, skądkolwiek wiatr wieje. Ilość obrotów liczą kółka zębate. Prędkość wiatru oblicza się podług ilości dokonanych w pewnym czasie obrotów. Im silniejszy jest wiatr, tem prędzej wiatrak się obraca.



Rys. 4.

Anemometr skrzydełkowy przedstawiony jest na rysunku 5.

W przyrządach tych liczba obrotów małego koła poruszanego wiatrem notowana jest z pomocą zwykłego mechanizmu licznika. Oznaczenie przeciętnej szybkości wiatru otrzymujemy, dzieląc liczbę obrotów w ciągu pewnego określonego czasu w sekundach przez odp. liczbę sekund. Na tarczy licznika oznaczona jest zazwyczaj nie liczba obrotów, lecz długość drogi przebytej przez wiatr, tak że, gdy podzielimy odczytaną liczbę przez czas, otrzymamy odrazu szybkość wiatru w metrach na sekundę.

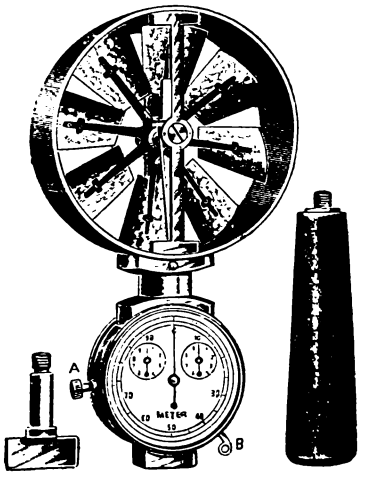
Najbardziej dokładne dane otrzymujemy posługując się anemometrami samopiszącemi, które notują wszystkie stopniowe zmiany szybkości wiatru.

6. **Podział wiatrów zależnie od szybkości.** Codzienne obserwowanie wiatrów może nam dać pożyteczny materjał do praktycznego wykorzystania tylko wtedy, jeśli obserwacje te prowadzone będą podług pewnych wskazówek, sumiennie i systematycznie w ciągu długiego szeregu lat. Zebrany w ten sposób materjał trzeba jeszcze należycie opracować.

Tylko przeciętne obliczenia w wyniku długoletnich badań dają właściwe pojęcie o kierunkach wiatru, o jego szybkości,

a także o częstotliwości pewnego rodzaju wiatrów; krótko mówiąc, tylko na zasadzie długoletnich spostrzeżeń można rozwiązać kwestję technicznego i gospodarczego wykorzystania energji wiatru w tej lub innej miejscowości.

Dla statystycznego opracowania danych dotyczących wiatrów ma wielkie znaczenie sposób podziału ich na grupy w zależności od szybkości. Niestety, niema ogólnie przyjętych granic dla pewnych grup. W różnych krajach przyjęty jest różny podział, co bardzo często utrudnia posługiwanie się danemi meteorologicznemi o wiatrach, opracowanemi w jednym kraju, do rozstrzygania zagadnień praktycznych w drugim kraju, lub choćby do przeprowadzenia pewnej analogji.



Rys. 5.

Tak naprzykład, Instytut Meteorologiczny w Berlinie dzieli wiatry zależnie od ich szybkości w sposób następujący:

od 0 do 1,2 m/sek
2 — 2,9 „
3 — 3,9 „
4 — 4,9 „
5 — 5,9 „
6 — 6,9 „
7 — 7,9 „
8 — 12 „ .

Instytut Aerodynamiczny w Göttingen:

od 0 do 2 m/sek
2 — 5 „
5 — 10 „
10 — 15 „
ponad 15 „ .

K. Bilau w książce p. t. „Die Windkraft in Theorie und Praxis", przytaczając dane o wiatrach w najróżniejszych krajach, dzieli je na następujące kategorje:

od 3 do 4 m/sek
4 — 5 „
5 — 6 „
7 — 8 „
8 — 9 „
9 — 10 „
ponad 10 „

S. Kuszel w pracy, wykonanej z inicjatywy Polskiego Komitetu Energetycznego, przyjął takie grupy:

cisza	
0 — 3	m/sek
3 — 5	„
5 — 10	„
10 — 15	„
powyżej 15	„

Oprócz szybkości wiatru i jego kierunku, spostrzeżenia anemometryczne powinny dać odpowiedź na pytanie, jak często ta lub inna grupa wiatrów się powtarza, a także jak długo trwa okres słabych wiatrów i zupełnej ciszy, mianowicie: a) przez ile godzin wieje bez przerwy wiatr o szybkościach mniejszych od 2 — 2,5 m/sek, czyli jak długo przeciętnie trwa okres ciszy (Flautenperiode) i b) przez ile godzin bezpośrednio po ciszy wieje bez przerwy wiatr o szybkościach większych od 2 — 2,5 m/sek.

7. **Statystyka wiatrów w Polsce.** Do lat ostatnich wiadomości o wiatrach w Polsce opierały się na opracowaniach autorów niemieckich i rosyjskich, którzy interesowali się temi danemi, o ile to wchodziło w zakres ich prac. Dopiero w r. 1930 zjawiła się praca S. Kuszela pod tytułem „Częstotliwość wiatrów dolnych na stacjach meteorologicznych w Pucku, Poznaniu, Warszawie, Wilnie, Pińsku, Lwowie, Krakowie i Zakopanem", następnie zaś praca L. Bartnickiego „Prądy powietrzne dolne w Polsce". Obydwie te prace zostały wykonane z inicjatywy Polskiego Komitetu Energetycznego.

Szczególnie wielkie znaczenie ma praca L. Bartnickiego. Autor zużytkował materjał statystyczny o wiatrach z 18 stacyj polskich oraz 8 stacyj państw ościennych, obejmujący dane z 25-cioletniego okresu obserwacyjnego, mianowicie od roku 1886 do 1910.

Niestety, nie wszystkie stacje posiadały materjał z całego tego okresu, a tylko 17 z nich, t. j. 65,4% całej ilości stacyj; 5 stacyj, t. j. 19,2%, posiadało dane z 20 — 24 lat i 4 stacje (15,4%) z 13 do 15 lat.

Liczba opracowanych obserwacyj jest bardzo wielka, mianowicie 647 771, ale rozkład geograficzny stacyj jest daleki od ideału: zupełnie zadowalniająco przedstawia się tylko zachodnia połowa Polski, natomiast na wschodzie, a częściowo i w środku kraju stacyj jest bardzo mało. Nie jest to jednak fakt zbytnio niepokojący, ponieważ część wschodnia jest to kraj przeważnie nizinny o równomiernym typie wiatrów.

Przy opracowaniu materjału zwracano uwagę na wymaga-

nia życia gospodarczego, pragnącego mieć odpowiedzi na pytania co do prędkości wiatrów, ich częstotliwości, udziału cisz oraz wiatrów bardzo słabych, słabych, umiarkowanych, silnych i bardzo silnych.

Wszystkie wiatry zostały podzielone na 5 grup.

Do pierwszej grupy zaliczono wiatry bardzo słabe, t. j. wiatry o szybkości od 0 do 2 m/sek (włącznie);

do drugiej grupy — wiatry słabe, od 2 do 5 m/sek (włącznie),

do trzeciej grupy — wiatry umiarkowane, od 5 do 10 m/sek (włącznie),

do czwartej grupy — wiatry silne, od 10 do 15 m/sek (włącznie),

i do piątej grupy — wiatry bardzo silne i wichury powyżej 15 m/sek.

Oprócz tego cisze zostały uwzględnione osobno

Cały materjał obserwacyjny został opracowany:

a) według każdej stacji dla każdego miesiąca,
b) „ „ „ dla 4 pór roku (zima, wiosna, lato, jesień),
c) „ „ „ dla przeciętnego roku.

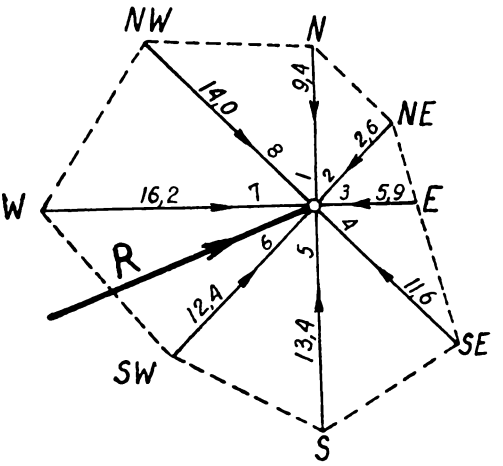
Dla uwidocznienia charakteru wspomnianego opracowania, podajemy poniżej części tablic tylko dla jednej stacji, mianowicie dla Warszawy.

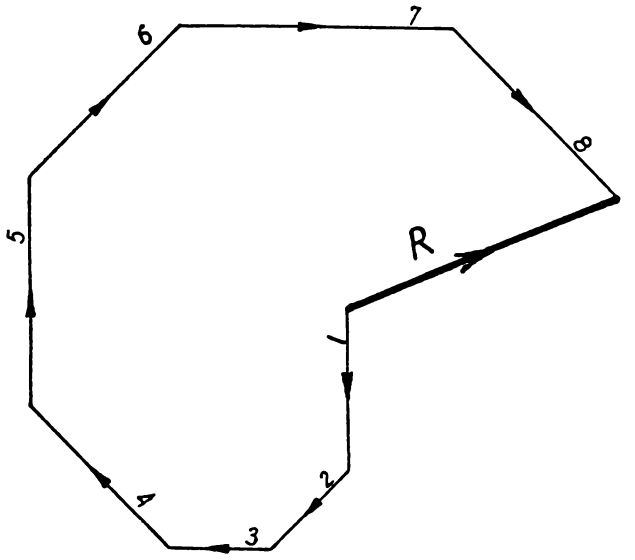
Na podstawie tak opracowanych danych można ustalić przeciętny kierunek wiatru w pewnym okresie czasu, przeciętną szybkość wiatru w tymże czasie, ilość energji wiatru odniesionej do 1 m^2 przekroju poprzecznego prądu powietrza dla danej stacji oraz przeciętną szybkość wiatru, przy której można otrzymać tę samą energję wiatrów różnych grup.

Do ustalenia przeciętnej szybkości i kierunku wszystkich wiatrów w pewnym okresie czasu można zastosować następujący sposób. Od punktu 0 kreślimy (rys. 6) w ośmiu kierunkach (stron świata) odcinki prostych, odpowiadające w pewnej skali liczbie procentów wiatru w danym kierunku w obranym okresie7 czasu. Tak naprz. dla Warszawy bierzemy dane z tablicy i kreślimy rys. 6.

Jeżeli przyjmiemy odcinki *ON*, *ONE*, *OE* i t. d. jako wektory sił, to możemy nakreślić wielobok sił (rys. 7), którego wypadkowa *AB* określa kierunek i wielkość przeciętnej szybkości. W tym wypadku $AB = 17{,}3\%$. Równolegle do linji *AB* (rys. 7) kreślimy linję *R* na rysunku 7.

Na podstawie danych, zestawionych w podanych tablicach, L. Bartnicki nakreślił szereg map, uwidoczniających przebieg wiatrów w Polsce. Niżej podaję tylko dwie z nich, mianowicie mapę położenia kwadrantów największej częstotliwości wiatrów w roku (rys. 8)[1]) i rozkład terenowy wiatrów bardzo słabych (do 2 m/sek) (rys. 9).





Rys. 6 i 7.

[1]) L. Bartnicki wyznacza kierunek wiatru nie średni dla pewnego okresu czasu, lecz przeważający, stosując metodę E. Rubinsteina oraz A. Kaminskija. (Prądy powietrzne dolne w Polsce, str. 5—12).

TABLICA 4.

Ćwiartka horyzontu o największej częstotliwości wiatru.

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Warszawa	S — 62	W — 6	E — 67	E — 80	E — 62	W — 54	W — 24	W — 12	W — 10	E — 88	S — 56	S — 12,5	W—8
			S — 33	S — 30	S — 27								
	W — 36	N — 35	W — 39,5	W — 52	W — 80	N — 42	N — 45	N — 47	N — 35	S — 37	W — 35	W — 36	N—35
			N — 30	N — 29	N — 28								

TABLICA 5.

Udział poszczególnych kierunków wiatrów w ruchu powietrza.

Rok Année Warszawa								Kierunki i szybkości wiatrów w %	Rok Année Ostrów							
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		N	NE	E	SE	S	WS	W	NW
28,7	37,9	33,9	28,4	30,5	28,6	20,4	19,4	od 0 — 2 m/s	37,5	*46,6*	39,2	42,0	39,4	44,3	26,3	34,4
53,2	51,5	49,1	51,8	*53,8*	49,2	48,2	50,4	ponad 2 do 5	43,8	36,2	40,0	40,0	44,5	38,2	39,1	37,2
17,0	10,6	15,3	19,0	14,9	21,8	29,0	28,0	ponad 5 do 10	16,6	13,8	16,3	13,0	13,1	13,7	22,9	18,7
1,1	—	1,7	0,8	0,8	1,6	2,4	2,2	ponad 10 do 15	2,1	3,4	4,5	4,0	3,0	3,8	9,3	7,5
—	—	—	—	—	0,8	—	—	ponad 15	—	—	—	1,0	—	—	2,4	2,2

TABLICA 6

Kierunki i szybkości wiatrów w %.

Warszawa 1886 — 1910 (25 lat)										Kierunki i szybkości wiatrów w %%	$\varphi = 52^{0}13'$; $\lambda = 21^{0}2'$; $h = 119{,}4$									
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C (cisza)	Suma		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	Suma
Styczeń obserw. 2325 Janvier											Zima obserw. 6765 Hiver									
1,4	1,2	1,1	2,8	4,1	2,5	2,4	1,7	—	17,2	od 0 do 2 m/s	1,4	1,4	1,3	2,9	3,8	2,6	2,1	1,5	--	17,0
3,3	3,3	3,2	6,3	9,8	7,4	7,2	5,1	—	45,8	ponad 2 do 5 „	3,4	3,0	3,7	7,1	9,4	7,2	6,9	5,7	—	46,4
1,8	0,8	1,4	2,5	2,7	4,9	6,8	6,1	—	27,0	„ 5 „ 10 „	2,1	0,7	1,2	2,8	2,9	4,5	7,0	5,6	—	26,8
0,1	—	—	0,1	0,1	0,6	1,3	0,6	—	2,8	„ 10 „ 15 „	0,1	—	0,0	0,1	0,2	0,5	1,0	0,7	—	2,6
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	„ 15 „	—	—	—	--	0,0	0,0	—	0,0	—	0,1
6,6	5,3	5,7	11,7	16,7	15,4	17,7	13,7	7,2	100,0	. . Suma . .	7,0	5,1	6,2	12,9	16,3	14,8	17,0	13,6	7,1	100,0

TABLICA 7

Zestawienia roczne.

Warszawa obserw. 27390										Kierunki i szybkości wiatrów w %%	Ostrów obserw. 25659									
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	Suma		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	Suma
Średni rok											Średni rok									
2,7	2,5	2,0	3,3	4,1	3,3	3,3	2,7	—	23,9	od 0 do 2 m/s	1,8	2,7	4,3	4,2	3,9	5,8	5,4	4,6	—	32,7
5,0	3,4	2,9	6,0	7,2	6,1	7,8	7,1	—	45,5	ponad 2 do 5 „	2,1	2,1	4,4	4,0	4,4	5,0	8,0	5,0	—	35,0
1,6	0,7	0,9	2,2	2,0	2,7	4,7	3,9	—	18,7	„ 5 „ 10 „	0,8	0,8	1,8	1,3	1,3	1,8	4,7	2,5	—	15,0
0,0	—	0 0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	—	1,3	„ 10 „ 15 „	0,1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,5	1,9	1,0	—	4,9
—		—	—	—	0,0	—	—	—	0,1	„ 15 „	—	--	--	0,1	—	0,0	0,5	0,3	—	0,9
9,4	6,6	5,9	11,6	13,4	12,4	16,2	14,0	10,5	100,0	. . Suma . .	4,8	5,8	11,0	10,0	9,9	13,1	20,5	13,4	11,5	100,0

Przebieg prądów powietrznych na ziemiach polskich charakteryzuje L. Bartnicki w taki sposób.

„Letnie miesiące — czerwiec, lipiec i sierpień i pierwszy miesiąc jesieni — wrzesień, to zdecydowana przewaga wiatrów zachodnich, przyczem daje się odczuwać pewne osłabienie prądów w miarę posuwania się ku wschodowi Polski, jednak to osłabienie wyraża się w sposób dość nikły.

W miesiącach jesiennych, a więc w październiku i listopadzie, uwydatniają się już prądy południowo-wschodnie, jednak przewaga leży po stronie wiatrów zachodnich, z wyjątkiem wschodu Polski, gdzie stosunki te przedstawiają się nieco odmiennie. Mianowicie na Polesiu oba układy prądów są niemal w równowadze, przeważa raz jeden, innym razem drugi układ, jednak b. nieznacznie. Na Wołyniu i Podolu natomiast wzrastają wybitnie kierunki lądowe; tam, gdzie miejscowość jest otwarta, dochodzi prąd zachodni powyżej 25%, natomiast w miejscowościach, leżących już nieco w zagłębieniach, prąd zachodni maleje szybko.

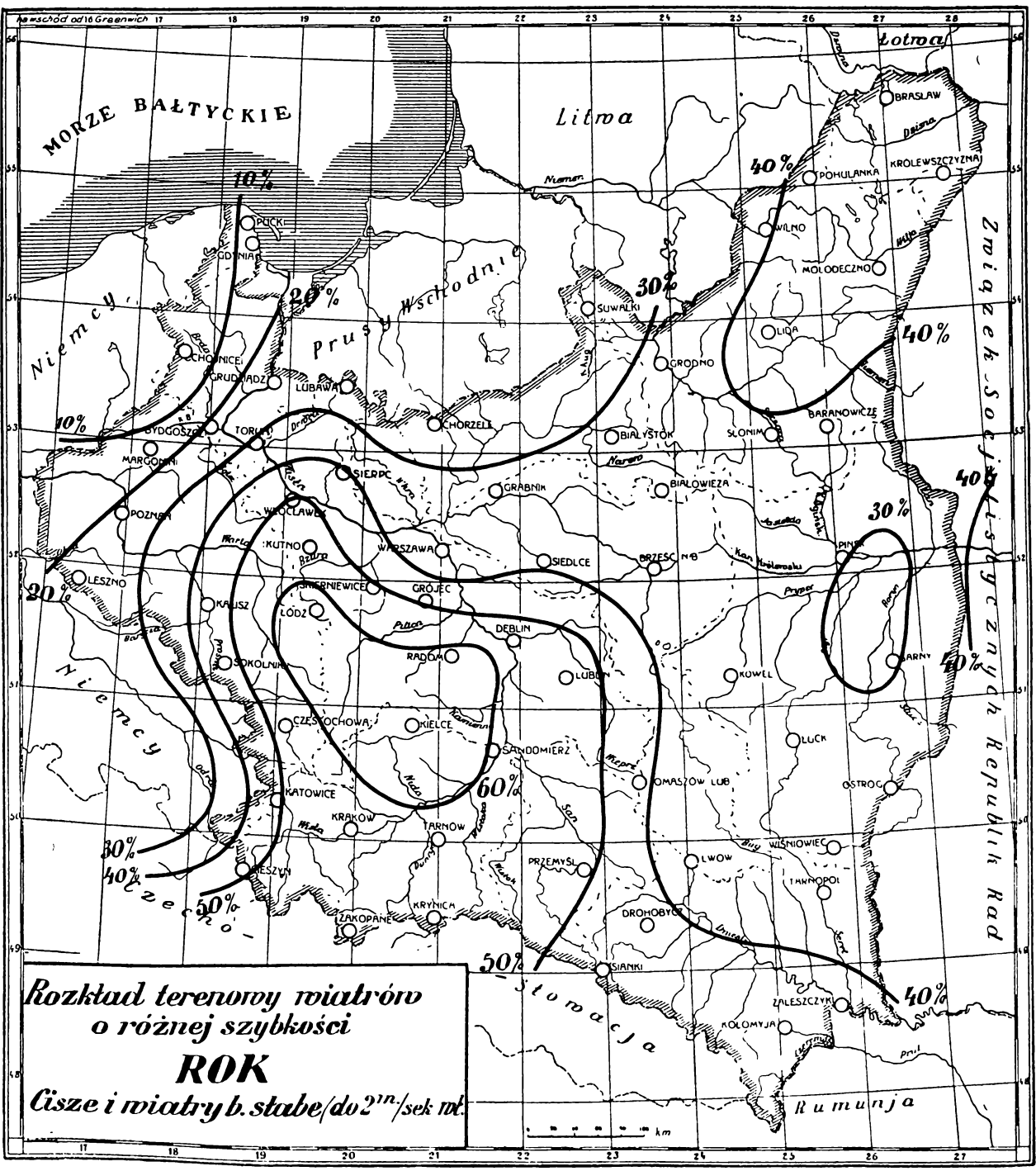
Zimą, t. j. przez styczeń, luty i grudzień, przebieg prądów powietrznych pozostaje mało zmieniony. Na wschodzie — na Podolu — w dalszym ciągu oba zasadnicze prądy są niemal w równowadze, tylko w styczniu prądy południowo-wschodnie osiągają pewną przewagę, lecz na krótko. Na Wołyniu prądy lądowe utrzymują się stale przez cały czas; na Podolu przewaga wiatrów lądowych występuje w grudniu, poczem oba prądy są niemal w równowadze. Wiosną układ dwóch prądów dominuje w dalszym ciągu w całej Polsce i wtenczas dopiero wpływy lądowe wybitniej dają się odczuwać. Wprawdzie na zachodzie Polski prądy zachodnie mają zawsze przewagę nad wiatrami południowo-wschodniemi, jednak na wschodzie przeważają ponownie te ostatnie w sposób wybitny, a głównie na Podolu i Wołyniu. Takiemi miesiącami przełomowemi dla Polski są miesiące: marzec i kwiecień.

Widzimy więc z tego, że niemożliwem jest podzielić Polskę na pewne dziedziny o silnie zróżnicowanym przebiegu prądów, gdyż niema wybitniejszych różnic pod tym względem.

Zjawia się teraz pytanie, czy istnieje jakaś wyraźna granica rozdziału wiatrów zachodnich i wschodnich. Sądząc z dawniejszych statystyk, możnaby twierdzić, że granica ta jest niemal zgodna z dzisiejszą granicą polityczną Polski na Polesiu. Na obszarze Polski wybitniej występują prądy wschodnie dopiero

Położenia kwadrantów największej częstotliwości wiatrów
ROK
MORZE BAŁTYCKIE
Litwa
Łotwa
Prusy Wschodnie
Niemcy
Czecho-Słowacja
Rumunja
Związek Socjalistycznych Republik Rad
BRASŁAW
POHULANKA
KRÓLEWSZCZYZNA
WILNO
MOŁODECZNO
SUWAŁKI
LIDA
GRODNO
BARANOWICZE
SŁONIM
BIAŁYSTOK
BIAŁOWIEŻA
GRABNIK
CHORZELE
SIERPC
WŁOCŁAWEK
KUTNO
WARSZAWA
SIEDLCE
BRZEŚĆ N/B
PINSK
SARNY
KOWEL
ŁUCK
OSTRÓG
WIŚNIOWIEC
TARNOPOL
LWÓW
DROHOBYCZ
SIANKI
ZALESZCZYKI
KOŁOMYJA
PRZEMYŚL
TARNÓW
KRAKÓW
KATOWICE
CIESZYN
ZAKOPANE
KRYNICA
SANDOMIERZ
KIELCE
CZĘSTOCHOWA
SOKOLNIKI
KALISZ
LESZNO
POZNAŃ
MARGONIN
BYDGOSZCZ
TORUŃ
GRUDZIĄDZ
CHOJNICE
GDYNIA
PUCK
LUBAWA
SKIERNIEWICE
ŁÓDŹ
GRÓJEC
DĘBLIN
RADOM
LUBLIN
TOMASZÓW LUB.
km

Rys. 8.


Rozkład terenowy wiatrów
o różnej szybkości
ROK
Cisze i wiatry b. słabe (do 2 m./sek wł.
MORZE BAŁTYCKIE
Litwa
Łotwa
Prusy Wschodnie
Niemcy
Czecho-Słowacja
Rumunja
Związek Socjalistycznych Republik Rad
BRASŁAW
POHULANKA
KRÓLEWSZCZYZNA
WILNO
MOŁODECZNO
SUWAŁKI
LIDA
GRODNO
BARANOWICZE
SŁONIM
BIAŁYSTOK
BIAŁOWIEŻA
GRABNIK
CHORZELE
LUBAWA
GRUDZIĄDZ
CHOJNICE
PUCK
GDYNIA
BYDGOSZCZ
TORUŃ
MARGONINI
POZNAŃ
LESZNO
SIERPC
WŁOCŁAWEK
KUTNO
WARSZAWA
SIEDLCE
BRZEŚĆ N/B
PINSK
SARNY
KOWEL
ŁUCK
OSTRÓG
WIŚNIOWIEC
TARNOPOL
LWÓW
DROHOBYCZ
ZALESZCZYKI
KOŁOMYJA
SIANKI
PRZEMYŚL
TARNÓW
KRAKÓW
KATOWICE
CZĘSTOCHOWA
KIELCE
SANDOMIERZ
LUBLIN
DEBLIN
RADOM
GRÓJEC
SKIERNIEWICE
ŁÓDŹ
KALISZ
SOKOLNIKI
KRYNICA
ZAKOPANE
CIESZYN
10%
20%
30%
40%
50%
60%
km

Rys. 9.

na Wołyniu i Podolu tuż przy naszej granicy; tutaj więc zasięg wiatrów wschodnich wrzyna się bardziej w nasze terytorjum.

Pod względem szybkości wiatrów uwydatniają się w Polsce dwie dziedziny o wzmożonej działalności atmosfery: jedna z nich obejmuje zachodnie okolice Wielkopolski i Pomorze, druga — wschodnie okolice Polski, więc Podole i Małopolskę Wschodnią. Szczególnie ta druga dziedzina jest bardzo charakterystyczna. Odznacza się ona większym udziałem wiatrów umiarkowanych i silnych w stosunku do okolic środkowych. W porównaniu z pierwszą dziedziną — na zachodzie Polski, ilości wiatrów umiarkowanych występują w obu dziedzinach niemal jednakowo. Dziedzina jednak zachodnia stanowczo ma przewagę pod względem częstości wiatrów silnych i bardzo silnych. Z innych cech charakterystycznych wymienić należy znaczny udział cisz i wiatrów bardzo słabych na wyżynie Małopolskiej, która stanowi poważną przeszkodę w ruchu powietrza w pobliżu ziemi. Wpływ ten rozciąga się daleko, dochodząc do średniego biegu Wisły. Gdybyśmy policzyli razem cisze, wiatry b. słabe i słabe, t. j. trzy pierwsze grupy, wtenczas okazałoby się, że Polska w znacznej mierze jest pod panowaniem wiatrów o niewielkiej stosunkowo szybkości, gdyż nie przekraczających 5 m/sek. Udział ten wynosi około 50% wszystkich wiatrów na Pomorzu, 60 do 70% na wschodzie, pozatem udział ich w innych okolicach kraju przekracza 75%, t. j. wynosi 3/4 wszystkich wiatrów, a na wyżynie Małopolski osiąga bardzo pokaźny odsetek 90%".

8. **Wykresy długości okresów trwania wiatrów.** Przy rozstrzyganiu różnych zagadnień praktycznych, często zachodzi potrzeba ustalenia, ile godzin w pewnym okresie czasu wieją wiatry o pewnej skali szybkości, naprz. od 4 m/sek do 10 m/sek, albo od 2 m/sek do 12 m/sek i t. p.

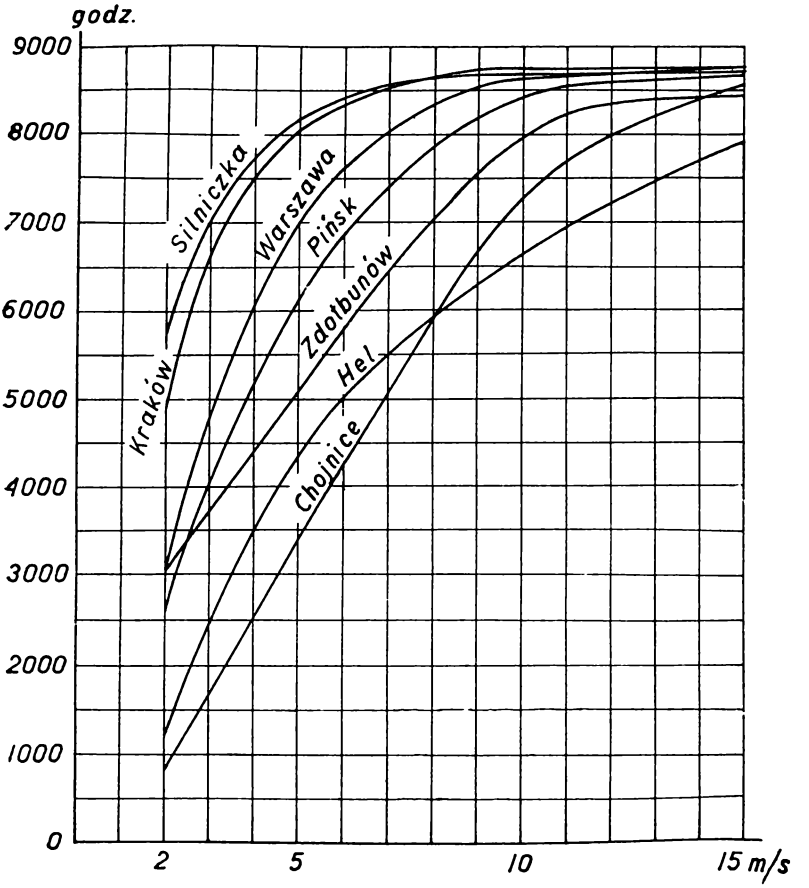
Tablice sporządzone przez L. Bartnickiego nie zawsze podają te wiadomości, ponieważ obliczone są tylko dla pewnych grup szybkości.

Dlatego też przy rozstrzyganiu zagadnień praktycznych pożytecznem jest sporządzenie specjalnego wykresu (krzywe liczby godzin) w sposób następujący (rys. 10).

Na osi poziomej odcinamy w pewnej skali (naprz. 1 cm = = 1 m/sek), szybkości wiatru od 0 do 15 m/sek, biorąc pod uwagę przestrzeń od powierzchni ziemi do wysokości 10 m. Dla większych wysokości możemy, korzystając z podanych wyżej wzorów (1) albo (2), obliczyć odpowiednie szybkości i umieścić je pod pierwszemi. Następnie przypuszczamy, że

procent obserwacyj jest ten sam w przeciągu badanego okresu czasu, zwykle roku. Zrobiwszy takie przypuszczenie, obliczamy dla każdej grupy wiatrów, począwszy od zupełnej ciszy, ilość odpowiednich godzin i odcinamy te ilości na odpowiednich rzędnych, przy każdej następnej dodając poprzednie.

Jako przykład, sporządzimy taki wykres dla Warszawy. Cisza i wiatry od 0 do 2 m/sek stanowią przeciętnie (tabl. 7)



Rys. 10.

10,5 + 23,9 = 34,4% liczby obserwacyj, czyli, zgodnie z naszem przypuszczeniem, również i liczby dni w roku, to jest $0{,}344 \times 365 \times 24 = 0{,}344 \times 8760 = 3013$ godzin. Linję wyrażającą tę liczbę odcinamy jako rzędną (Y) nad punktem 2 m/sek. Następnie wiatry o szybkościach od 2 do 5 m/sek stanowią 45,5%, co wynosi $0{,}455 \times 8760 = 3986$ godzin. Trwanie ciszy i wszystkich wiatrów do 5 m/sek szybkości włącznie wynosi

3013 + 3986 = 6999 godzin; oznaczamy to w powyższy sposób nad punktem 5 m/sek. Wiatry o szybkościach od 5 — 10 m/sek stanowią 18,7%, to jest 1638 godzin, a łącznie ze słabszemi wiatrami 6999 + 1638 = 8637 godzin; wiatry o szybkości 10 — 15 m/sek wykazują 1,3%, czyli 114 godzin, co łącznie z poprzedniemi wynosi 8637 + 114 = 8751 godzin; wreszcie wiatry o szybkości większej od 15 m/sek stanowią 0,1%, czyli 9 godzin, ogółem więc 8760 godzin.

Po połączeniu odpowiednich rzędnych otrzymujemy wykres ilości godzin; krzywa ta może służyć do prędkiego obliczania ilości godzin przypadających w ciągu roku na wiatry pewnej grupy szybkości. O ile chcemy naprzykład obliczyć ile godzin w ciągu roku wieją wiatry o szybkościach od 3 m/sek do 12 m/sek, to odczytujemy według przyjętej skali różnicę rzędnych tej krzywej nad punktami 3 i 12; różnica ta wyraża poszukiwaną przez nas liczbę godzin. Na rysunku 10 podane są dla porównania krzywe dla niektórych innych miejscowości w celu uwidocznienia ich charakteru w stosunku do ilości i siły wiatrów. Rozpatrując te krzywe, widzimy, że wiatry o szybkości od 3 m/sek do 15 m/sek wieją przeciętnie: na Helu — 5300 godzin w okolicach Warszawy — 4050 godzin, w okolicach Zdołbunowa — 4780 godz. i t. d.

9. **Energja wiatru.** Po zapoznaniu się z rozmaitemi właściwościami wiatru i z metodami opracowania danych statystycznych, rozpatrzymy teraz zagadnienie energji wiatru oraz możliwości i sposoby wykorzystania tej energji.

Jak wiadomo z mechaniki, ciało, które spada swobodnie z wysokości h, nabywa prędkość

$$v=\sqrt{2gh} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

gdzie g oznacza przyśpieszenie = 9,81 m/sek^2. I odwrotnie, wysokość, z której spadło ciało, posiadające prędkość v, będzie:

$$h=\frac{v^2}{2g} \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

O ile ciężar będącego w ruchu, a spadającego z wysokości h ciała jest G, to zdolność jego do wykonania pewnej pracy, czyli zapas jego energji wynosi:

$$L=Gh=G\frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Stosunek $\frac{G}{g}$ nazywamy masą ciała i oznamy literą m; przy takiem oznaczeniu możemy napisać wzór (5) w postaci:

$$L=\frac{mv^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Zatem ciało, posiadające masę m i poruszające się z prędkością v, zdolne jest do wykonania pracy, czyli posiada energję, równą $\frac{mv^2}{2}$. Tę zdolność do wykonania pracy czyli energję nazywamy energją kinetyczną, w odróżnieniu od energji potencjalnej, którą posiada naprzykład ciało, znajdujące się na pewnej wysokości, z której może spaść, lub np. woda, spiętrzona groblą. Poruszające się powietrze — wiatr, posiada tak samo, jak każde inne poruszające się ciało fizyczne, energję ruchu, czyli energję kinetyczną.

Jak już wspomniano, 1 m^3 powietrza przy temperaturze 15°C i ciśnieniu barometrycznem 760 mm waży 1,225 kg, czyli posiada ciężar właściwy $\gamma = 1{,}225$[1]). Dzieląc ciężar jednostki objętości powietrza γ przez przyśpieszenie ziemskie g, otrzymamy masę jednostki objętości powietrza, czyli gęstość powietrza:

$$\sigma=\frac{\gamma}{g}=\frac{1{,}225}{9{,}81}=\frac{1}{8}\,\frac{\text{kg}\times\text{sek}^2}{\text{m}^4} \qquad (7)$$

Q m^3 powietrza, poruszającego się z szybkością v m/sek, ma zdolność do wykonania pracy, czyli posiada energję

$$L_0=Q\sigma\frac{v^2}{2}=\sim\frac{1}{16}Qv^2 \quad . \qquad (8)$$

A zatem 1 m^3 powietrza, posiadający naprzykład szybkość około 10 m/sek, mógłby w warunkach doskonałych wykonać $\frac{1}{16}\times 1\times 10^2=\frac{100}{16}=\sim 6$ kgm pracy.

Gdyby szybkość powietrza wynosiła tylko 5 m/sek, to zapas energji w 1 m^3 powietrza byłby $=\frac{1}{16}\times 1\times 5^2=\frac{25}{16}=\sim 1{,}5$ kgm, czyli 4 razy mniejszy, aniżeli przy szybkości 10 m/sek.

---

[1]) Przy 0°C ciężar 1 m^3 powietrza wynosi $\gamma = 1{,}2932$ kg.

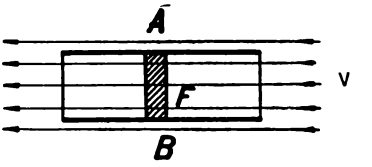
ROZDZIAŁ II.

Zasady wykorzystania energji wiatru.

Pojęcia zasadnicze. Zasady pracy skrzydeł wiatraka. Stopień wyzyskania energji wiatru. Rozkład siły naporu wiatru na skrzydło. Spółczynniki aerodynamiczne. Wyzyskanie siły oporu do napędu wiatraka. Praca skrzydeł pod działaniem siły nośnej. Sprawność skrzydeł. Spółczynnik momentu.

1. **Pojęcia zasadnicze.** Wyżej określono całkowitą energję, jaką przy pewnej szybkości posiada 1 m^3 powietrza. Powstaje pytanie, jak i jaką część tej energji można wykorzystać?

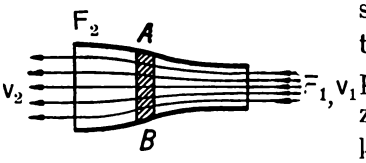
Wyobraźmy sobie rurę o wewnętrznym przekroju F m^2, ustawioną tak w stosunku do kierunku wiatru, ażeby powietrze przepływało przez nią bez przeszkód (rys. 11).



Rys. 11.

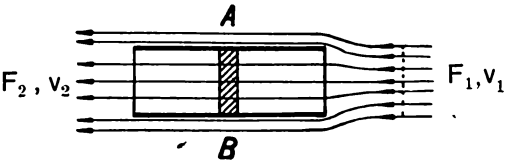
Jeżeli szybkość powietrza wynosi v m/sek, to w ciągu jednej sekundy wchodzi do rury i wychodzi z niej powietrze o objętości $Q = Fv$ m^3.

Jeżeli teraz umieścimy wewnątrz rury jakiś przyrząd AB, wykorzystujący energję wiatru, to wykorzystanie to będzie się odbywało kosztem szybkości dolotowej v_1. Po wykorzystaniu energji, powietrze będzie wychodziło z rury z szybkością v_2, mniejszą od szybkości v_1; lecz objętość powietrza wychodzącego jest taka sama, jak powietrza wchodzącego. Celem osiągnięcia tego, koniecznem jest, by rura przy wyjściu była rozszerzona i miała tu taki przekrój F_2, przy którym $F_2v_2 = F_1v_1 = Q$ (rys. 12).



Rys. 12.

Jeślibyśmy nie zrobili takiego rozszerzenia, to powietrze natrafiłoby u wylotu rury (rys. 13) na opór, wskutek czego tylko pewna część objętości Q przedostałaby się do rury i wyszła by z niej, — pozostała zaś ilość odbiłaby się i przeszła nazewnątrz rury. Objętość Q przechodzącego przez rurę powietrza oblicza



Rys. 13.

się zatem według przekroju poprzecznego wylotu rury F_2 i szybkości v_2 w tej części rury, mianowicie $Q = F_2 v_2$.

1 m³ powietrza o szybkości v_1 posiada według wzoru (8) zapas energji $L_1 = \frac{\sigma}{2} v_1^2$; o ile szybkość zmniejszy się do v_2, to w tejże objętości powietrza (1 m³) pozostanie jeszcze zapas energji równy $L_2 = \frac{\sigma}{2} v_2^2$. Różnica między temi ilościami energji może być zamieniona na pracę w silniku; a więc

$$L_1 - L_2 = \frac{\sigma}{2}(v_1^2 - v_2^2) . \qquad (9)$$

Jeśli w ciągu godziny przejdzie przez rurę Q m³ powietrza, to w tym czasie może być wykonana praca:

$$L = Q \frac{\sigma}{2}(v_1^2 - v_2^2) \text{ kgm}, . \qquad (10)$$

na sekundę zaś

$$\frac{L}{3600} = \frac{Q}{3600} \frac{\sigma}{2}(v_1^2 - v_2^2) \text{ kgm} . . . . . (11)$$

Jeżeli wyrażenie (11) podzielimy przez 75, to otrzymamy moc silnika:

$$N = \frac{L}{3600 \times 75} = \frac{Q}{3600 \times 75} \cdot \frac{\sigma}{2}(v_1^2 - v_2^2) . \text{KM} . \qquad (12)$$

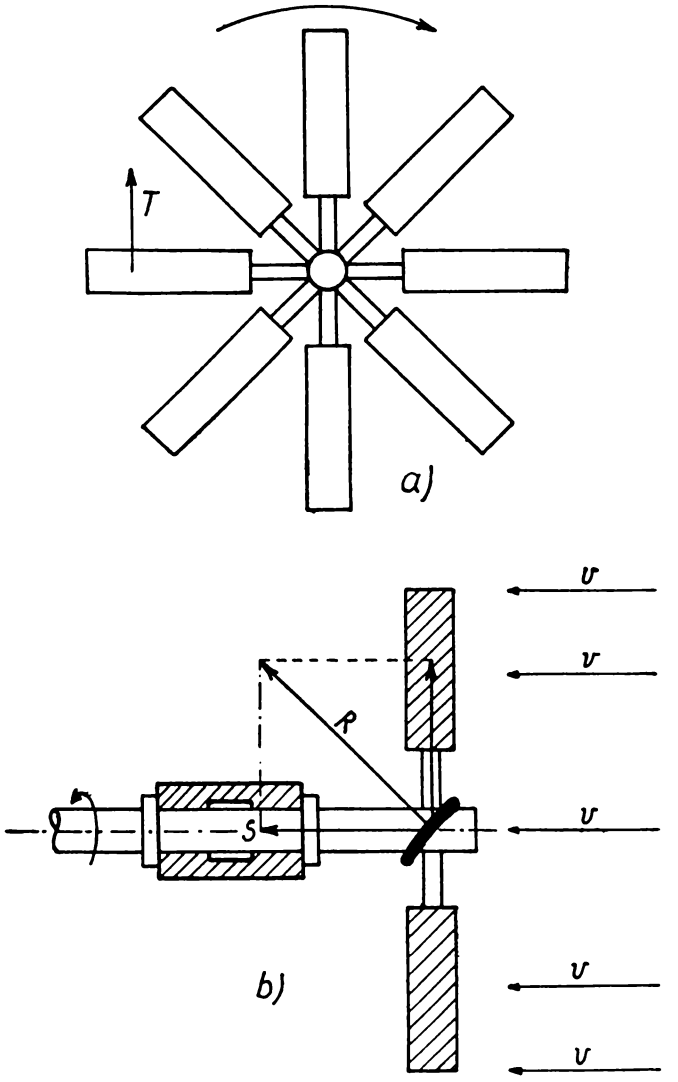
lub

$$N_1 = \frac{L}{3600 \times 102} = \frac{Q}{3600 \times 102} \cdot \frac{\sigma}{2}(v_1^2 - v_2^2) \text{ kW} . \qquad (13)$$

Z poprzedniego wynika, że im więcej energji wykorzystamy, tem mniejsza będzie szybkość v_2. Jeżelibyśmy potrafili wykorzystać całą energję, to szybkość v_2 spadłaby do zera, a prąd powietrza a zarazem i dalsza praca silnika ustałaby, z drugiej zaś strony, o ile nie zmniejszylibyśmy w rurze prędkości powietrza, również żadnego efektu nie otrzymalibyśmy, podobnie jak to miało miejsce w pierwszym wypadku. A więc najbardziej sprzyjające warunki wykorzystania energji wiatru leżą gdzieś po środku: silnik pochłania tylko część energji, a reszta uchodzi w postaci energji odpływającego powietrza. Wynika z tego, że całkowita energja wiatru nigdy nie może być wykorzystana.

2. **Zasady pracy skrzydeł wiatraka.** Kierując się powyższemi rozumowaniami, rozpatrzmy teraz w ogólnych zarysach zjawisko, zachodzące w śmigach wiatraka. Typowy kształt wiatra-

ków, najbardziej rozpowszechnionych, z zachodzącemi odmianami w szczegółach, przedstawiony jest na rys. 14a i 14b. Na wale, ustawionym mniej więcej w kierunku wiatru, umieszcza się szereg, od dwóch do kilkudziesięciu, skrzydeł, ustawionych



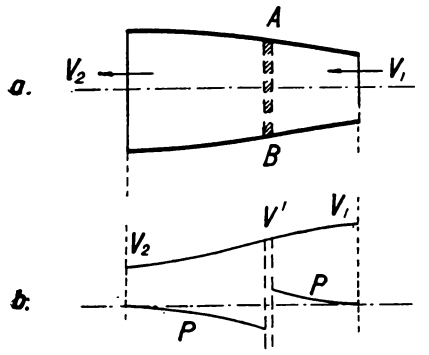
Rys. 14a i 14b.

nie prostopadle do kierunku wiatru, lecz ukośnie. Napór wiatru na skośnie ustawione skrzydło rozkłada się na dwie siły — jedną styczną do skrzydła, a drugą *R*—normalną do profilu skrzydła. Ta ostatnia rozkłada się znowu na dwie siły: jedną

równoległą do osi koła, a drugą normalną do niej. Pierwszą siłę S równoważą opór ramion koła i odpór wału, druga T, t. zw. kompensacyjna, obraca koło, które w ten sposób wykonywa pracę. Do bardziej szczegółowego rozważenia rozkładu sił i określenia ich wielkości powrócimy później, narazie tylko zatrzymamy się na wyjaśnieniu, w jakim stopniu wiatrak, pracujący na wolnem powietrzu, a nie w rurze kierowniczej, wykorzystuje energję wiatru.

Podczas obracania się skrzydeł, stały strumień powietrza płynącego w ich obrębie tworzy jakby cylinder powietrzny o średnicy równej rozpiętości skrzydeł.

Dla uproszczenia rozważań, przyjmujemy koło wiatraka jako tarczę, przepuszczającą w pewnym stopniu powietrze, oraz przypuszczamy, że z każdej części tej tarczy można uzyskać największą możliwą ilość energji. Przypuszczenia takie nie są sprzeczne z rzeczywistością, nawet w wypadku, kiedy ilość skrzydeł jest mała, albo jeśli ich jest tylko dwa; a to dlatego, że szybkość obracania się wiatraka jest tem większa, im mniej jest skrzydeł (jak to zobaczymy dalej); przy znacznej szybkości obrotu skrzydeł, powierzchnia poddana ciśnieniu wiatru w okresie jednostki czasu jest też znaczna.



Rys. 15 a i b.

Wyobraźmy sobie takie wyidealizowane koło AB w rurze z rozszerzeniem (rys. 15a).

Powietrze dopływa do koła AB z szybkością v_1, zaś koło AB przejmuje taką ilość energji, że szybkość powietrza wychodzącego będzie mniejsza i równa v_2. Przejście od jednej szybkości do drugiej nie odbywa się raptownie. Zjawisko to przebiega w ten sposób, że już przed kołem szybkość powietrza trochę się zmniejsza, natomiast ciśnienie barometryczne wzrasta (rys. 15b). Dzięki temu, choć na koło oddziaływa wiatr o mniejszej szybkości, lecz pod większem ciśnieniem. Wskutek odbioru przez koło energji zmniejsza się ciśnienie powietrza, tak iż powietrze za kołem będzie miało ciśnienie mniejsze, aniżeli powietrze otaczające je; co się tyczy szybkości, to w samem kole, które wyobrażamy sobie jako cienką tarczę, szybkość nie zmienia się. Dopiero po wyjściu z koła szybkość w dalszym ciągu się zmniej-

sza, a ciśnienie — zwiększa, dopóki nie zrówna się z ciśnieniem otaczającego powietrza. A więc przez koło powietrze przechodzi nie z szybkością v_1, ani też z szybkością v_2, lecz z jakąś szybkością pośrednią v'. Badania teoretyczne wykazują, że szybkość

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad *) \qquad . \quad (14)$$

3. **Stopień wyzyskania energji wiatru.** Przyjmując wartość v', jak wyżej, możemy obliczyć pracę, którą powietrze może wykonać w kole wiatraka.

Masa powietrza, przechodzącego w sekundę przez koło, będzie:

$$m = \sigma v' F = \sigma \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right) F,$$

praca zaś:

$$L = \frac{m}{2}(v_1^2 - v_2^2) = \frac{\sigma}{4}(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) F \quad . \quad . \quad (15)$$

Zbadajmy, przy jakim stosunku v_2 do v_1 uzyskamy największy odbiór energji.

Oznaczymy stosunek $\frac{v_2}{v_1}$ przez x; wówczas

$$L = \frac{\sigma}{4}(v_1 + v_1 x)(v_1^2 - v_1^2 x^2) F,$$

czyli

$$L = \frac{\sigma}{4} v_1^3 F (1 + x)(1 - x^2),$$

$$L = \frac{\sigma}{4} v_1^3 F (1 + x - x^2 - x^3) \qquad (16)$$

Praca L będzie największą wtedy, gdy wyrażenie w nawiasach osiągnie maximum; aby wyznaczyć wartość x, przy której wyrażenie w nawiasie będzie miało maximum, obliczamy pierwszą pochodną względem x wyrazu $(1 + x - x^2 - x^3)$ i przyrównywamy ją do zera:

$$1 - 2x - 3x^2 = 0,$$

czyli

$$3x^2 + 2x - 1 = 0,$$

skąd

$$x = \frac{-2 \pm \sqrt{4 + 12}}{6} = \frac{1}{3}.$$

---

*) A. Betz. Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. 1926, str. 10 — 11.

Najkorzystniejszy zatem stosunek v_2 do v_1 równy jest $\frac{1}{3}$, to jest $v_2 = \frac{1}{3} v_1$; a wyzyskana w idealnem kole energja będzie równa

$$L_{max} = \frac{\sigma}{4} v_1^3 F \left(1 + \frac{1}{3} - \frac{1}{9} - \frac{1}{27}\right) = \frac{16}{27} \cdot \frac{\sigma}{2} v_1^3 F,$$

lub, oznaczając szybkość dopływającego do koła wiatru ogólnie przez v, otrzymamy:

$$L_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\sigma}{2} v^3 F \text{ kgm/sek}, \quad . \quad . \quad (17)$$

czyli

$$L_{max} = 0{,}5926 \frac{\sigma}{2} v^3 F \text{ kgm/sek}. \quad . \quad . \quad (17')$$

Całkowity zapas energji wiatru (wzór 8) $L_0 = Q \sigma \frac{v^2}{2}$, ponieważ zaś $Q = Fv$, więc

$$L_0 = \frac{\sigma}{2} v^3 F, \quad (18)$$

zatem

$$L_{max} = \frac{16}{27} L_0, \text{ czyli } 0{,}5926\, L_0 . \quad . \quad (19)$$

Spółczynnik $\frac{16}{27}$ czyli 0,5926 nazywa się *maksymalnym spółczynnikiem wyzyskania energji wiatru* i oznacza się ξ_{max}, a więc

$$\xi_{max} = \frac{16}{27} = 0{,}5926 \quad . \quad . \quad (20)$$

Jeżeli dla σ przyjmiemy w przybliżeniu wartość 1/8, to

$$L_{max} = 0{,}5926 \times \frac{1}{16} v^3 F = 0{,}037\, v^3 F \text{ kgm/sek},$$

lub też

$$L_{max} = 0{,}037\, v^3 F \times \frac{1}{75} KM = 0{,}000494\, v^3 F \text{ KM} . \quad (21)$$

Biorąc pod uwagę, że powierzchnia koła F równa się πR^2 czyli $\frac{\pi D^2}{4}$, możemy napisać

$$L_{max} = \frac{1}{27} v^3 \frac{\pi D^2}{4} \text{ kgm/sek} = \frac{1}{27} v^3 \pi R^2$$

lub

$$L_{max} = \frac{1}{27} v^3 \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{1}{75} \text{ KM} = 0{,}000388\, v^3 D^2 \text{ KM}, \quad (22)$$

albo wreszcie

$$L_{max}=\frac{1}{27}v^3\frac{\pi D^2}{4}\times\frac{1}{102}=0{,}000285\ v^3D^2\,\text{kW} \quad . \quad . \quad (23)$$

Z rachunku tego wynika, że przy poczynionych wyżej założeniach, które są jednak bliskie rzeczywistości, największe teoretyczne wyzyskanie dopływającej do wirnika energji wiatru dochodzi do 0,5926 L_0.

Jednakże w praktycznem zastosowaniu nie można osiągnąć nawet takiego stopnia wyzyskania energji wiatru, ponieważ z jednej strony zamiana energji kinetycznej na pracę mechaniczną silnika nie może się odbyć bez strat na szkodliwe opory, z drugiej zaś strony rzeczywisty stosunek szybkości v_2 do v_1 tylko w rzadkich wypadkach równa się $^1/_3$, t. j. bywa najbardziej korzystny. To też rzeczywista praca koła L_d zawsze jest mniejsza od teoretycznie największej L_{max}.

Stosunek mocy rzeczywistej L_d do teoretycznej L_{max} nazywa się sprawnością skrzydeł i oznacza się przez η, t. j.

$$\eta=\frac{L_d}{L_{max}}. \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

$$\text{A zatem } L_d=\eta L_{max}=\eta\frac{16}{27}\frac{\sigma}{2}v^3\frac{\pi D^2}{4}, \quad . \quad . \quad (25)$$

czyli

$$L_d=\xi\frac{\sigma}{2}v^3\frac{\pi D^2}{4}=\xi\frac{\sigma}{2}\pi R^2v^3\ \text{kgm/sek}, \quad (26)$$

lub, wyrażając w koniach mechanicznych:

$$L_d=0{,}000835\,\xi Fv^3\ \text{KM}. \quad . \quad (27)$$

gdzie $\xi=\frac{16}{27}\eta$ zawsze będzie mniejsze od 0,5926.

Wzór (19), mianowicie $L_{max}=\frac{16}{27}.L_0$, otrzymaliśmy w wyniku przyjęcia pewnych założeń, naprzykład, że skrzydła stanowią płaską tarczę; to też powstaje pytanie, czy nie dałoby się współczynnika $\frac{16}{27}$ (czyli 0,5926) zwiększyć.

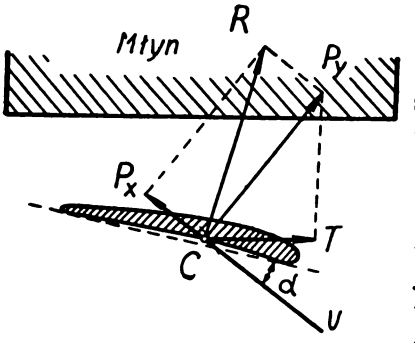
Łatwo sobie wyobrazić, że przez zastosowanie drugiego wirnika, który zostałby umieszczony bezpośrednio za pierwszym, możnaby było wykorzystać część energji, która pozostała w wietrze po wprowadzeniu w ruch pierwszego koła; następnie przez zastosowanie trzeciego koła można byłoby wyzyskać jeszcze część energji i t. d. Przy takiej konstrukcji silnik

wietrzny przedstawiałby się jako walec o kilku kołach, przyczem stosunek L_{max} do L_0 zbliżyłby się do 1. Tak przedstawia się sprawa pod względem teoretycznym. W rzeczywistości jednak zbudowanie tak skomplikowanego silnika wietrznego kosztowałoby drożej, aniżeli odpowiednie zwiększenie średnicy koła, wobec czego sposób ten w praktyce nie ma zastosowania.

Tu należy wspomnieć, że największa możliwa wartość spółczynnika $\frac{16}{27}$, obliczona jak wyżej, w ostatnich czasach została zakwestjonowana przez inż. Sabinina*), który, zmieniając założenia, dochodzi do wniosku, że spółczynnik ξ_{max} dla wiatraka idealnego należy przyjmować równy 0,687, t. j. niemal o 10% większy od $\frac{16}{27}$. Słuszność jednak tych nowych założeń nie jest jeszcze wyjaśniona, stąd i nadal przyjmować będziemy $\xi_{max} = 0{,}5926$.

4. **Rozkład siły naporu wiatru na skrzydło.** Po wyjaśnieniu wyżej w ogólnym zarysie sposobu przenoszenia energji wiatru na śmigi wiatraka, przejdziemy do bardziej szczegółowego rozpatrzenia oddziaływania wiatru na skrzydła i do wyjaśnienia ich racjonalnego kształtu oraz odpowiedniego rozmieszczenia w stosunku do kierunku wiatru.

Dotychczas przypuszczaliśmy, że powietrze przechodzi prostopadle do płaszczyzny tarczy, którą zastąpiliśmy śmigi wiatraka, oraz że ciśnie nań prostopadle i symetrycznie. Jeżeli ciało nie leży symetrycznie w stosunku do linji oddziaływania wiatru, to wypadkowa R naporu wiatru w środku ciśnienia C (rys. 16) może być rozłożona na dwie składowe, z których jedna P_x działa w kierunku wiatru, a druga P_y — do niej prostopadle. Pierwsza nazywa się siłą oporu, a druga—siłą nośną. Siłę R można oczywiście rozłożyć w dowolnych kierunkach, omówiony jednak rozkład ma to znaczenie, że siła P_x jest równoległa do kierunku wiatru, a równa jej i przeciwległa siła reakcji skrzydeł zmniejsza szybkość wiatru. Siła zaś P_y



Rys. 16.

*) G. Ch. Sabinin. Tieorija idiealnawo wietriaka. Moskwa 1927.

jest prostopadła do linji prądu powietrza i przeciwległa jej reakcja nie wywiera żadnego wpływu na zmianę szybkości wiatru. Ponieważ siła P_x wywołuje zmniejszenie energji wiatru, to pożądane jest używanie skrzydeł o takich profilach, w których stosunek siły oporu do siły nośnej byłby możliwie mały.

5. **Spółczynniki aerodynamiczne.** Opierając się na danych doświadczalnych, stwierdzających, w zakresie spotykanych w praktyce prędkości, zależność sił nośnej i oporu od drugiej potęgi prędkości i pierwszej potęgi gęstości powietrza, możemy napisać wyrażenia na te siły w postaci następującej:

$$P_y = C_y \frac{\sigma}{2} F v^2 \quad . \quad . \qquad (29)$$

$$P_x = C_x \frac{\sigma}{2} F v^2 \quad . \quad . \quad . \qquad (30)$$

$$R = C \frac{\sigma}{2} F v^2 \quad . \quad . \qquad (31)$$

przyczem spółczynniki oderwane C_y, C_x i C zależą od kształtu przekroju skrzydła i jego ustawienia w stosunku do kierunku wiatru, t. j. od kąta α (rys. 16).

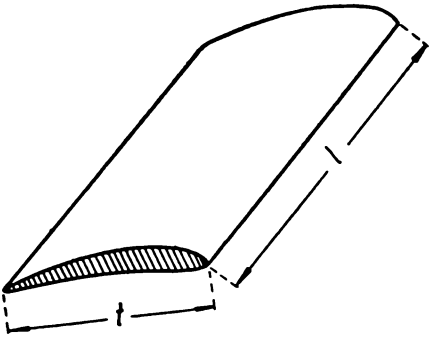
Ponieważ $R^2 = P_y^2 + P_x^2$,

to $$C^2\left(\frac{\sigma}{2} F v^2\right)^2 = C_y^2\left(\frac{\sigma}{2} F v^2\right)^2 + C_x^2\left(\frac{\sigma}{2} F v^2\right)^2,$$

czyli

$$C^2 = C_y^2 + C_x^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (32)$$

W poprzednich wzorach figuruje wielkość powierzchni F. Należy ustalić, jaką mianowicie powierzchnię należy przyjąć do rachunku. Dla skrzydeł przyjęto uważać za F największy rzut skrzydła. Dla prostokątnego wygiętego skrzydła (rys. 17) o długości l i szerokości t powierzchnia $F = lt$. Dla ciał, których kształt daje przeważnie składową oporu P_x, największa powierzchnia znajduje się zazwyczaj w ustawieniu prostopadłem do kierunku wiatru.

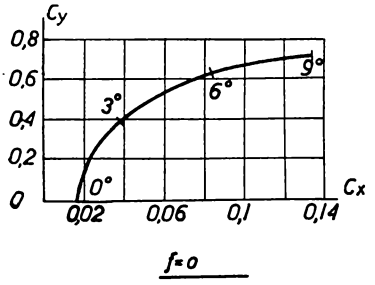


Rys. 17.

Siły nośna i oporu dla danego skrzydła w istotnej mierze zależą od kąta natarcia α, t. j. od kąta między kierun-

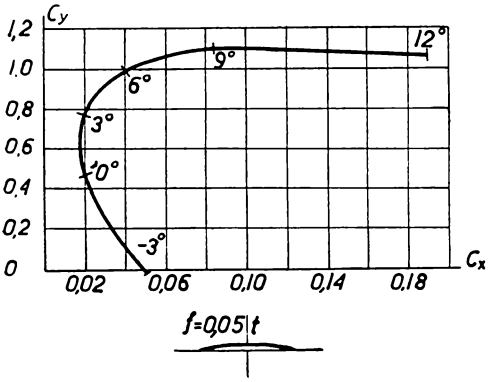
kiem wiatru a cięciwą poprzecznego przekroju skrzydła (rys. 16).

Badania nad skrzydłami o rozmaitych profilach ustaliły odpowiednie wartości C_y i C_x. Dla przykładu zamieszczamy niżej wykreślne ujęcie tych wartości dla trzech profili (rys. 18, 19 i 20).



Rys. 18.

Jak widać z powyższych wykresów, spółczynnik C_y dla korzystnych profilów ma wartość kilka razy większą od C_x. Tak naprzykład dla profilu w formie wygiętego płata (rys. 19) przy $\alpha = 6^0$ spółczynnik $C_y = 1{,}0$, a spółczynnik $C_x = 0{,}04$, stosunek zaś $\frac{C_y}{C_x} = 25$; przy $\alpha = 12^0$ spółczynnik $C_y = 1{,}07$, a $C_x = 0{,}19$; $\frac{C_y}{C_x} = 5{,}6$. Ciekawe jest, że profile z małemi przecięciami dają szczególnie korzystny stosunek $\frac{C_y}{C_x}$. Dlatego też często można zauważyć, że na włościańskich młynach skrzydła wiatraków obite są deszczułkami tak, że nie są one ułożone jedna obok drugiej, lecz jedna na drugą zachodzi, wskutek czego wiatr, wiejący w kierunku ruchu skrzydła, może cokolwiek przechodzić między deszczułkami (rys. 21).



Rys. 19.

Opór skrzydła zależy od dwu zasadniczych składników: t. zw. oporu profilowego C_{xp}, zależnego wyłącznie od kształtu przekroju skrzydła i oporu indukcyjnego C_{xi} zależnego od stosunku szerokości l do długości l skrzydła. Spółczynnik oporu indukcyjnego wyraża się w zależności od siły nośnej wzorem:

$$C_{xi} = \frac{C_y^2}{\pi} \cdot \frac{l}{l} \qquad (30')$$

Całkowity spółczynnik oporu

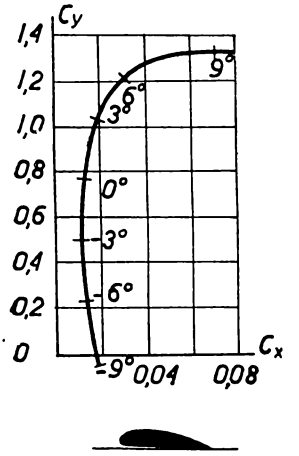
$$C_x = C_{xp} + C_{xi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30''$$

W zwykłych skrzydłach powstaje w większości przypadków na brzegach ich tak znaczna strata energji i tak wielki opór, że przewyższa on opór zależny od kształtu profilu.

6. **Wyzyskanie siły oporu do napędu wiatraka.** Wyzyskanie do uruchomienia skrzydła siły nośnej P_y, prostopadłej do kierunku wiatru, możliwe jest tylko przy wyżej rozpatrzonem położeniu skrzydła.

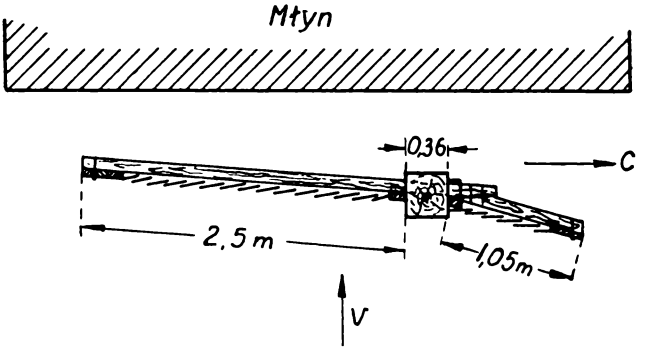
Można sobie jednak wyobrazić takie ustawienie skrzydeł, przy którem mogą być one uruchamiane z pomocą siły P_x, mającej kierunek wiatru.

I rzeczywiście, skonstruowano wiele silników wietrznych, których ruch wywołuje nie siła nośna, a siła oporu. Chociaż typ ten nie znalazł szerokiego zastosowania, jednakże pożytecznem będzie rozpatrzeć sposób zamiany w takim silniku energji wiatru na energję mechaniczną.



Rys. 20.

Dla ułatwienia wyobraźmy sobie, że wiatr ciśnie na płaszczyznę ustawioną szeroką stroną AB przeciw wiatrowi (rys. 22).



Rys. 21.

Na płaszczyznę oddziaływa pewna siła P_x, zależna od szybkości wiatru v. O ile płaszczyzna pozostałaby w spoczynku, to ciśnienie wiatru byłoby niewykorzystane, t. j. praca nie byłaby wykonana.

Jeśliby płaszczyzna zaczęła się poruszać w kierunku wiatru

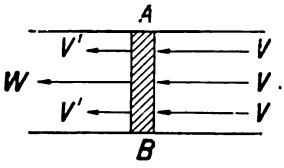
z szybkością v', to wykonałaby w ciągu sekundy pracę $P_x v'$; ale podczas ruchu jej z szybkością v' szybkość względna wiatru wynosiłaby $v - v'$. Jeżeli pole płaszczyzny $= F$, a spółczynnik oporu, znany z doświadczenia, $= C_x$, to siła oporu według wzoru (30) będzie:

$$P_x = C_x \frac{\sigma}{2} F (v - v')^2 \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

a praca tej siły

$$L = P_x v' = C_x \frac{\sigma}{2} F (v - v')^2 v' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

Porównywując tę pracę, czyli wykorzystaną energję, z energją L_0 zawartą w powietrzu, przepływającem przez powierzchnię F z szybkością v, t. j. z $L_0 = \frac{\sigma}{2} F v^3$, otrzymamy:



Rys. 22.

$$\frac{L}{L_0} = \frac{C_x \frac{\sigma}{2} F (v - v')^2 v'}{\frac{\sigma}{2} F v^3} =$$

$$= \frac{C_x (v^2 - 2vv' + v'^2) v'}{v^3};$$

czyli

$$C_x \left(\frac{v^2 v'}{v^3} - \frac{2vv'^2}{v^3} + \frac{v'^3}{v^3} \right) = C_x \left[\frac{v'}{v} - 2 \left(\frac{v'}{v} \right)^2 + \left(\frac{v'}{v} \right)^3 \right] =$$

$$= C_x \frac{v'}{v} \left[1 - 2 \frac{v'}{v} + \left(\frac{v'}{v} \right)^2 \right] = C_x \frac{v'}{v} \left(1 - \frac{v'}{v} \right)^2.$$

Stosunek $\frac{L}{L_0}$ zmienia się w zależności od stosunku $\frac{v'}{v}$, Osiągając wartość największą, gdy wyraz $\frac{v'}{v} - 2 \left(\frac{v'}{v} \right)^2 + \left(\frac{v'}{v} \right)^3$ jest największy. W celu określenia tego maximum oznaczamy stosunek $\frac{v'}{v}$ przez x i pochodną wyrazu $x - 2x^2 + x^3$ przyrównywamy do zera:

$$\frac{d (x - 2x^2 + x^3)}{dx} = 1 - 4x + 3x^2 = 0; \quad x = \frac{4 \pm \sqrt{4^2 - 3 \times 4}}{6} = \frac{1}{3};$$

a więc

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{3};$$

$$\frac{L}{L_0} = C_x \times \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3} \right)^2 = \frac{4}{27} C_x \quad . \quad . \quad (35)$$

Spółczynnik C_x dla płata można przyjąć równy 1,3, wtedy $\frac{L}{L_0}=1{,}3\times\frac{4}{27}=\frac{5{,}2}{27}$. Poprzednio ustaliliśmy, że dla idealnego koła poruszającego się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru stosunek $\frac{L}{L_0}=\frac{16}{27}$; jak widzimy, jest on trzykrotnie większy.

Należy jeszcze podkreślić, że w ostatnim przypadku powierzchnia F, z pomocą której wykorzystujemy energję wiatru, równa się nie powierzchni skrzydła, lecz powierzchni koła, którą skrzydło zatacza.

W ten sposób dochodzimy do wniosku, że silniki wietrzne, wykorzystujące siłę oporu P_x, a są to silniki o skrzydłach obracających się przeważnie dokoła osi pionowej, są mniej korzystne, aniżeli silniki o skrzydłach, obracających się w płaszczyźnie bliskiej do pionowej. To też praktyczne zastosowanie znalazły tylko silniki drugiego typu. Jednakże, jak zobaczymy dalej, silniki o osi pionowej mają też pewne zalety.

7. **Praca skrzydeł pod działaniem siły nośnej.** Przyjrzyjmy się bliżej działaniu wiatru na skrzydła wiatraka, obracające się w płaszczyźnie niemal pionowej. Każdy punkt takiego skrzydła posiada wskutek obrotu pewną szybkość u, prostopadłą do osi wału. Punkt, znajdujący się w odległości r od tej osi, opisuje przy pełnym obrocie drogę długości $2\pi r$. Jeżeli koło robi n obrotów na minutę, to w ciągu sekundy punkt przebywa drogę

$$2\pi r\frac{n}{60},$$

czyli

$$u=2\pi r\frac{n}{60}=r\frac{2\pi n}{60}.$$

Oznaczając $\frac{2\pi n}{60}$ przez ω (prędkość kątowa), otrzymamy:

$$u=r\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

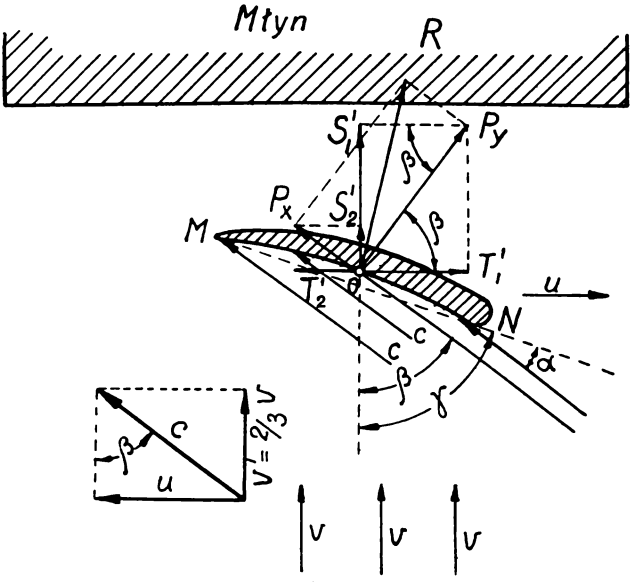
Wskutek ruchu obrotowego, każdy punkt skrzydła, znajdujący się w odległości r od osi, podlega działaniu jakby drugiego wiatru, wiejącego z szybkością $u_1 = -r\omega$ w kierunku odwrotnym do ruchu skrzydła.

Szybkość v wiatru zmniejszona przed skrzydłem do $v' = 2/3\ v$, oraz szybkość u_1, spowodowana ruchem skrzydła, dają wypadkową c w kierunku skośnym do profilu skrzydła (rysunek 23).

Oprócz wymienionych przyczyn, zmniejszających szybkość i zmieniających kierunek wiatru, istnieją jeszcze inne. Jednakże do praktycznych celów wystarczy poprzestać na wyżej przytoczonych. Kąt β, który tworzą wypadkowa c i oś koła, można obliczyć z rysunku jako:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'}, \quad \text{czyli } \sin\beta = \frac{u}{c}, \quad \text{a } \cos\beta = \frac{v'}{c} \; . \tag{37}$$

Jeśli skrzydło skonstruowane jest tak, że w pewnym punkcie (dla różnych r są różne warunki) ma ono najkorzystniejszy kąt α między cięciwą MN a skośnym kierunkiem wiatru c, wówczas na powierzchnię f elementu skrzydła oddziaływa siła



Rys. 23.

nośna $P_{yf} = C_y \frac{\sigma}{2} c^2 f$ i stosunkowo niewielka siła oporu $P_{xf} = C_x \frac{\sigma}{2} c^2 f$ (wartości spółczynników C_y i C_x znamy z doświadczenia). Składowa siły nośnej w kierunku ruchu skrzydła, t. j. równoległa do szybkości u, t. zw. siła „kompensacyjna", będzie równa $T'_f = P_{yf} \cdot \cos\beta$. Odpowiednia składowa siły oporu będzie $T''_f = P_{xf} \sin\beta$, przyczem kierunek jej jest przeciwny sile T_f'.

Otóż siła, która oddziaływa na element skrzydła w kierunku jego ruchu będzie

$$T_f = T_f' - T_f'' = P_{yf} \cos\beta - P_{xf} \sin\beta \; . \tag{38}$$

Drugie dwie składowe $S_f' = P_{yf} \sin\beta$ i $S_f'' = P_{xf} \cos\beta$ oddziaływują w kierunku osi i suma ich będzie równa

$$S_f = S_f' + S_f'' = P_{yf} \sin\beta + P_{xf} \cos\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

W dobrze skonstruowanych skrzydłach siła oporu P_x jest b. mała, to też w takich wypadkach składowe oporu można pominąć i wówczas otrzymamy:

$$T_f = P_{yf} \cos\beta \quad . \quad (40)$$

$$S_f = P_{yf} \sin\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

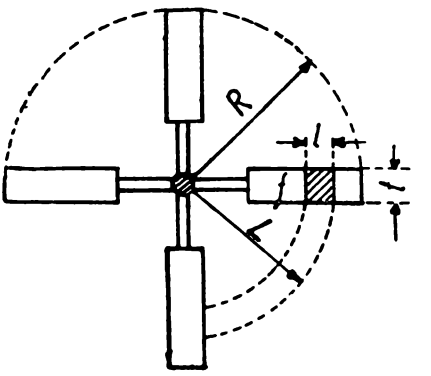
$$\operatorname{tg}\beta = \frac{S_f}{T_f} = \frac{u}{v'} \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Wartość kąta $\gamma = \beta + \alpha$, przy której praca L_f jest największa, znajdujemy ze wzoru Maclaurin'a

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{3u + \sqrt{9u^2 + 8v^2}}{2v} \quad . \quad . \quad (43)$$

Wzory te wyprowadzone są tylko dla jednego elementu skrzydła, znajdującego się w odległości r od osi. W celu obliczenia sił T i S, działających na całe skrzydło, trzeba byłoby dodać wszystkie poszczególne siły.

Do obliczeń wstępnych wystarcza często określić siły, działające na pewne elementy skrzydła, znajdujące się w odległości 2/3 R od osi, i otrzymane dane rozszerzyć na całe skrzydło.



Rys. 24.

Rozważmy element skrzydła długości l w odległości $r = 2/3\ R$ od osi (rys. 24); przy szerokości skrzydła t powierzchnia elementu $f = lt$. Siła nośna dla tego elementu $P_{yf} = C_y \frac{\sigma}{2} c^2 lt$.

Jeśli liczba skrzydeł równa się z, to siła w kierunku osi

$$S_{zf} = zP_{yf} \sin\beta = zC_y \frac{\sigma}{2} c^2 lt \frac{u}{c} = zC_y \frac{\sigma}{2} uclt \quad . \quad . \quad (43')$$

Siła ta działa na skrzydła, lecz jednocześnie taka sama siła przeciwdziała naporowi powietrza, zmniejszając szybkość wiatru. Można przyjąć, że w przybliżeniu siła S_{zf} oddziaływa na to

powietrze, które przechodzi przez koło, zakreślane przez omawiane elementy skrzydeł. Powierzchnia tego koła $= 2\pi rl$, a objętość przechodzącego przezeń w ciągu 1 sek powietrza $G_f = 2\pi rlv'$. Szybkość tego powietrza pod działaniem siły S_{zf} zmniejsza się z v do v_2; wobec tego

$$S_{zf} = \text{masa} \times \text{przyśpieszenie} = \sigma Q_f (v - v_2);$$

czyli

$$S_{zf} = \sigma 2\pi rlv'(v - v_2);$$

ale

$$v' = \frac{v + v_2}{2};$$

stąd

$$v_2 = 2v' - v;\ v - v_2 = v - 2v' + v = 2(v - v');$$

a więc

$$zC_y \frac{\sigma}{2} uclt = \sigma 2\pi rlv' 2(v - v')$$

i stąd

$$t = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{4}{C_y} \cdot \frac{v'}{u} \cdot \frac{v - v'}{c}; \quad \ldots\ldots \quad (44)$$

przy najkorzystniejszym stosunku $\frac{v'}{v} = {}^2/_3$, otrzymamy dla t:

$$t_{\text{opt.}} = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{8}{9C_y} \cdot \frac{v^2}{uc}, \quad \ldots \quad (45)$$

a ponieważ $c = \sqrt{({}^2/_3 v)^2 + u^2}$,

więc

$$t_{\text{opt.}} = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{8v^2}{9C_y u\sqrt{({}^2/_3 v)^2 + u^2}} \quad (45')$$

W ten sposób otrzymaliśmy szerokość skrzydła t, niezbędną do zmniejszenia szybkości wiatru z v do v_2.

Ponieważ przyjęliśmy liczbę skrzydeł równą z, więc $\frac{2\pi r}{z}$ określi odległość między środkami skrzydeł na obwodzie koła c o promieniu r, czyli gęstość skrzydeł δ, t. j. $\delta = \frac{2\pi r}{z}$.

Analizując wzór (45), dochodzimy do następujących wniosków: 1) szerokość skrzydła t powinna być tem mniejsza, im większy jest spółczynnik C_y; 2) szerokość skrzydła zależy od wielkości stosunku $\frac{v^2}{uc}$. Przyjrzyjmy się temu wyrazowi. Jeżeli szybkość u danego punktu skrzydła jest większa od szybkości wiatru v, to $\frac{v}{u} < 1$, a ponieważ $c = \sqrt{v'^2 + u^2}$, więc $\frac{v}{c}$ jest

także <1. Otóż w silnikach szybkobieżnych $\frac{v^2}{uc}$ będzie małe, dlatego też wartość t powinna być również mała, to znaczy, że skrzydła powinny być wąskie. W silnikach wolnobieżnych o większej liczbie skrzydeł szybkość obwodowa u jest mała i dlatego $\frac{v}{u}$ i $\frac{v}{c}$ będą większe aniżeli w pierwszym przypadku i w tych silnikach szerokość skrzydeł t powinna być większa.

Stosunek szerokości skrzydła t do odległości pomiędzy skrzydłami nazywa się gęstością δ_0 rozłożenia skrzydeł; ze wzoru (44) widać, że

$$\delta_0 = \left(t : \frac{2\pi r}{z}\right) = \frac{8}{9C_y} \cdot \frac{v^2}{uc} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

W silnikach wolnobieżnych gęstość jest znacznie większa aniżeli w szybkobieżnych, co osiąga się zapomocą większej liczby skrzydeł.

8. **Sprawność skrzydeł.** Ostatnie wnioski oparte są na przypuszczeniu, że można nie uwzględniać siły oporu. Należy jeszcze wyjaśnić stosunek sił S_f i T_f dla tych przypadków, kiedy siła oporu nie może być pominięta. Jak widać z rysunku 23, siły

$$S_f = P_{yf} \cdot \sin\beta + P_{xf} \cos\beta, \text{ czyli } S_f = P_{yf} \cdot \sin\beta\,(1 + \varepsilon \operatorname{ctg}\beta)$$

$$T_f = P_{yf} \cdot \cos\beta + P_{xf} \sin\beta, \text{ czyli } T_f = P_{yf} \cdot \cos\beta\,(1 - \varepsilon \operatorname{tg}\beta),$$

przytem $\varepsilon = \frac{P_x}{P_y}$. Praca uzyskana z energji wiatru $= S_f v'$. Praca dostarczana przez skrzydła $= T_f u$; spółczynnik sprawności skrzydła

$$\eta = \frac{T_f u}{S_f v'} = \frac{P_{yf} \cos\beta\,(1 - \varepsilon \operatorname{tg}\beta)\,u}{P_{yf} \sin\beta\,(1 + \varepsilon \operatorname{ctg}\beta)\,v'} = \frac{1 - \varepsilon \operatorname{tg}\beta}{1 + \varepsilon \operatorname{ctg}\beta} \cdot \frac{\cos\beta}{\sin\beta} \cdot \frac{u}{v'};$$

lecz ponieważ $\frac{u}{v'} = \operatorname{tg}\beta$ (rys. 23), to

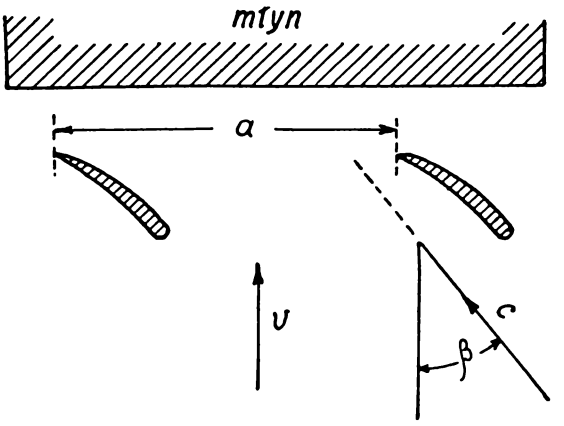
$$\eta = \frac{1 - \varepsilon \operatorname{tg}\beta}{1 + \varepsilon \operatorname{ctg}\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

Ostatni wzór dowodzi, że sprawność skrzydła zmienia się w zależności od $\varepsilon = \frac{P_x}{P_y}$ i od $\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'}$. Im większy jest stosunek $\frac{u}{v'}$, tem większe są te zmiany. W silnikach szybkobieżnych stosunek ten na końcach skrzydeł jest o wiele większy aniżeli w wolnobieżnych. Dlatego też należy zwracać spe-

cjalną uwagę na profil końcowych części skrzydeł i starać się zmniejszyć ich spółczynnik ε.

W silnikach wolnobieżnych spółczynnik ten nie odgrywa dużej roli, wobec czego profile skrzydeł mogą być prostsze.

Należy uwzględnić jeszcze jedną okoliczność, mianowicie zmniejszenie wykorzystania siły wiatru na końcach skrzydeł



Rys. 25.

w porównaniu z elementami skrzydeł położonemi bliżej osi. Doświadczenia ze śmigłami wykazały, że zamiast rzeczywistej średnicy koła D należy przyjmować jako czynną—zmniejszoną średnicę D', którą otrzymujemy ze wzoru:

$$D' = D - 0{,}44\, a \cos\beta, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (48)$$

gdzie a jest odległością między profilami skrzydeł (rys. 25) $= \frac{\pi D'}{z}$.

Ze wzoru (48) otrzymujemy średnicę rzeczywistą, mianowicie:

$$D = D' + 0{,}44\, a \cos\beta. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (49)$$

9. **Spółczynnik momentu.** W rozważaniach naszych rozpatrywaliśmy dla uproszczenia tylko element skrzydła o powierzchni f i działające nań siły, w tej liczbie siłę T_f. A jednak nie jest wszystko jedno, gdzie, mianowicie, siła ta jest przyłożona, t. j. w którem miejscu obieramy element f. Im dalej od osi leży rozpatrywany przez nas element, tem skuteczniejsza jest ta siła, albowiem ramię jej jest większe. Dlatego też, oprócz pracy siły T_f, należy jeszcze określić dla każdego elementu moment siły $T_f \cdot r$, następnie zaś przez dodawanie wyznaczyć moment całkowity M, który obraca skrzydło.

Gdy rozpatrywaliśmy wydajność wiatraka, porównywaliśmy ją z energją wiatru i określaliśmy spółczynnik sprawności

$$\eta = \frac{L_d}{L_{max}} \quad \ldots \ldots \quad (24)$$

Teraz porównamy moment M z momentem idealnym M_o, który otrzymalibyśmy przy energji L_{max} i prędkości obwodowej koła u, równej szybkości wiatru v, wtedy $T_o v = L_{max}$;

$$T_o = \frac{L_{max}}{v}, \text{ a } T_o R = M \quad \ldots \ldots \quad (50)$$

$$M_o = \frac{L_{max} R}{v} = \frac{L_{max} \frac{D}{2}}{v} = \frac{\sigma}{2} v^2 \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{D}{2} \quad \ldots \quad (51)$$

Stosunek momentu rzeczywistego M_d do momentu idealnego M_o nazywa się spółczynnikiem momentu i oznacza się przez C_m; zatem

$$C_m = \frac{M_d}{M_o}; \quad M_d = C_m M_o = C_m \frac{\sigma}{2} v^2 \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{D}{2} \quad (52)$$

$$M_d = C_m \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{\pi v^2 D^3}{4 \quad 2}, \quad \ldots \ldots \quad (52')$$

ale $M_d = \dfrac{L_d \frac{D}{2}}{u}$, zaś $M_o = \dfrac{L_{max} \frac{D}{2}}{v}$, więc $C_m = \dfrac{L_d \frac{D}{2}}{u} : \dfrac{L_{max} \frac{D}{2}}{v}$

czyli $C_m = \dfrac{L_d}{L_{max}} \cdot \dfrac{v}{u}$, skąd $C_m = \eta \dfrac{v}{u} \quad \ldots \ldots \quad (53)$

Spółczynnik C_m zależy więc od stosunków $\dfrac{L_d}{L_{max}}$ i $\dfrac{v}{u}$. Tu znowu daje się zauważyć znana różnica między silnikami szybkobieżnemi a wolnobieżnemi. W silnikach szybkobieżnych stosunek $\dfrac{v}{u}$ jest kilka razy mniejszy aniżeli w wolnobieżnych, zatem spółczynnik C_m, a więc i moment, również są kilka razy mniejsze.

ROZDZIAŁ III.

Doświadczenia z wiatrakami.

Spostrzeżenia prof. P. La Cour'a.—Badania T. Ch. Sabinina i K. Bilau'a. Dane katalogowe.—Spółczynniki wyzyskania energji wiatru.—Rozporządzalna energja użyteczna wiatru.—Tunele aerodynamiczne.—Prawo podobieństwa.

Przytoczone teoretyczne rozumowania i wyprowadzone wzory dają tylko podstawy do projektowania silników wietrznych. W celu lepszego dostosowania ich do zjawisk rzeczywistych

należy wprowadzać poprawki, otrzymywane drogą obserwacji i doświadczeń.

Spostrzeżenia odbywały się i mogą się odbywać nad wiatrakami naturalnej wielkości oraz w warunkach rzeczywistych. Doświadczenia zaś wykonywa się z modelami w specjalnych laboratorjach.

1. **Spostrzeżenia prof. P. La Cour'a.** Najbardziej znane są spostrzeżenia nad wiatrakami różnych systemów dokonane przez prof. La Cour'a w Danji w okresie 16 lat, począwszy od roku 1897 do r. 1908. Prof. La Cour na podstawie tych spostrzeżeń doszedł do wniosku, że najbardziej praktyczny jest wiatrak czteroskrzydłowy o pewnej konstrukcji skrzydeł, a zwłaszcza o prawidłowo ustalonym kącie α dla poszczególnych części skrzydła, t. j. w różnych odstępach od osi.

La Cour podzielił skrzydło na kilka części i każdej nadał odpowiedni kąt $\alpha = 90 - \gamma$ (rys. 23) w sposób wyjaśniony w tablicy 8.

TABLICA 8.

Stosunek prędkości danego punktu skrzydła do szybkości wiatru	0	0,8	1,2	1,6	2,0	2,2	2,4
Kąt $(90^0-\gamma)$ w/g LaCour'a	25^0	20^0	$17^030'$	15^0	$12^030'$	$11^015'$	10^0
w/g Maclaurina . . .	$19^030'$	$18^010'$	$13^050'$	$10^050'$	9^0	$8^010'$	$7^040'$

Na zasadzie tych doświadczeń La Cour określa idealny wiatrak, jak następuje:

a) 4 skrzydła z możliwie najmniejszym oporem, zwłaszcza przy zewnętrznych ich krańcach.

b) Szerokość skrzydeł winna być prawie jednakowa na całej długości i wynosić 1/4 — 1/5 długości skrzydła.

c) Płaszczyzna skrzydła zaczyna się mniej więcej od 1/4 długości skrzydła, licząc od osi, to znaczy stanowi 3/4 długości całego skrzydła.

d) Poprzeczny profil skrzydła nie jest linją prostą, lecz łamaną albo wygiętą w punkcie znajdującym się w odstępie 1/4 lub 1/6 szerokości skrzydła od przedniej krawędzi. Dotyczy to zewnętrznej strony skrzydła, gdyż strona wewnętrzna może mieć profil prostolinjowy.

e) Nachylenie skrzydła między jego cięciwą a kierunkiem wiatru podane jest w tablicy.

f) Wiatrak powinien być tak skonstruowany, by końce skrzydeł miały szybkość 2,4 razy większą aniżeli szybkość wiatru, przy której zamierzamy osiągnąć największą wydajność (szybkość ta wynosi w przybliżeniu 5 — 6 m/sek).

g) Pracę, którą wiatrak taki może wykonać, obliczyć można w sposób następujący: przyjmujemy, że z 1 m^2 powierzchni skrzydeł przy szybkości 1 m/sek można uzyskać 60 gramometrów, z tego wynika, że przy powierzchni $F m^2$ i szybkości wiatru v m/sek praca wynosiłaby $60 \times F \cdot v^3$ gramometrów, czyli $0{,}06\, Fv^3$ kilogramometrów na sekundę, co w koniach mechanicznych wynosi $L = \frac{0{,}06}{75} Fv^3 = 0{,}0008\, Fv^3$ KM.

Uwaga: Otrzymana w ten sposób wartość L jest znacznie większa aniżeli L_{max}, według wzoru (21) równa $0{,}000494\, Fv^3$, przyczem ξ równe jest około 0,96 zamiast 0,5926, dlatego też jest nieprawdopodobna (patrz rys. 17).

Porównując wiatraki czteroskrzydłowe z wieloskrzydłowemi, La Cour zwrócił uwagę, że przy mniejszych szybkościach wiatru, aniżeli panujące w Danji (6 — 7 m/sek), należy stosować wiatraki wieloskrzydłowe.

Jak wynika z powyższego, La Cour doszedł do wielu ciekawych wniosków, jednakże wartość spółczynnika ξ określił nieściśle. Bowiem w rzeczywistości w praktycznem zastosowaniu niema jeszcze ani jednego wiatraka, któryby posiadał ξ równe choćby 0,5926.

2. **Badania G. Ch. Sabinina i K. Bilau'a.** Późniejsze badania K. Bilau'a i G. Sabinina dały w wyniku inne wartości spółczynnika ξ.

Sabibin[1]) robił doświadczenia z 4 modelami silników wietrznych:

1. Wiatrak amerykański 18-skrzydłowy. Średnica skrzydeł modelu 0,3 m. Stosunek szybkości skrzydła u do szybkości wiatru v był $z = \frac{\omega R}{v} = 1{,}2$.

2. Wiatrak holenderski o 4 skrzydłach; średnica skrzydeł modelu 0,36 m; $z = 1{,}8$.

3. Szybkobieżny wiatrak czteroskrzydłowy; $z = 3$.

4. Szybkobieżny wiatrak dwuskrzydłowy; średnica skrzydeł modelu 0,36 m; $z = 5$.

---

[1]) G. Ch. Sabinin. Charaktieristika wietrodwigatiela. Moskwa 1926. Wyd. N. G. O. WSNCh.

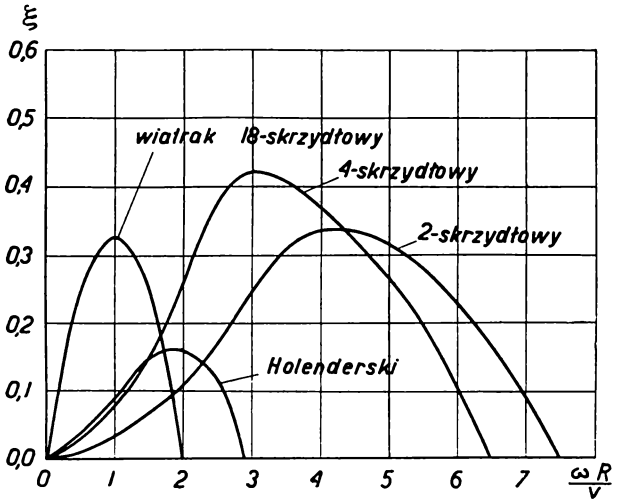
Doświadczenia te odbywały się w laboratorjum aerodynamicznem Instytutu Geofizycznego w Kuczynie pod Moskwą.

Przy wyznaczaniu spółczynnika ξ posługiwano się wzorem (26)

$$\xi = \frac{2L}{\sigma \pi R^2 v^3}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (54)$$

gdzie L wyrażano w kgm.

Wartości ξ przedstawione są wykreślnie na rys. 26.



Rys. 26.

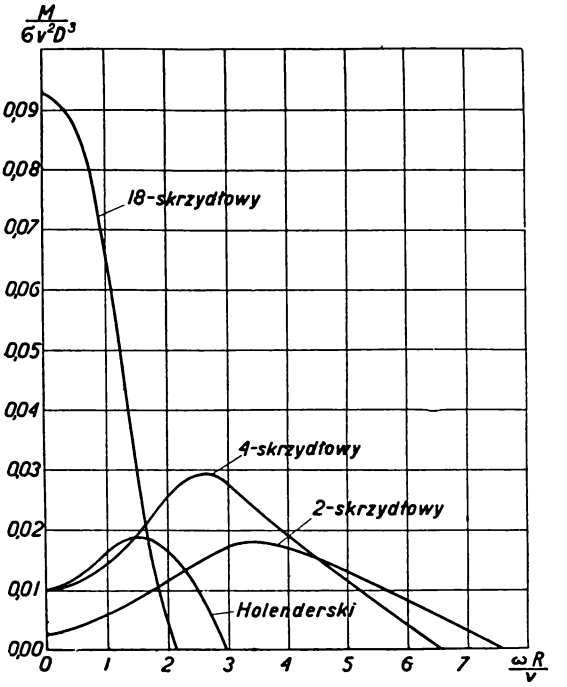
Jak widać, największą wartość $\xi = 0{,}42$ wykazał wiatrak czteroskrzydłowy przy $z = 3{,}1$. Nieco mniejszą wartość posiadał wiatrak dwuskrzydłowy, mianowicie $\xi = 0{,}36$ przy $\frac{\omega R}{v} = 4{,}3$. Wolnobieżny amerykański — $\xi = 0{,}33$ przy $\frac{\omega R}{v} = 1{,}17$. Wreszcie wiatrak holenderski wykazał najmniejsze $\xi = 0{,}17$ przy $\frac{\omega R}{v} = 1{,}95$.

Nie jest wykluczone, że te same typy wiatraków, lecz w wielkości naturalnej, dałyby nieco pomyślniejsze wyniki.

Podczas doświadczeń określano także dla wszystkich typów momenty rozruchowy i czynny. Wyniki obliczenia stosunku momentu M do $\sigma v^2 D^3$ przedstawione są na rysunku 27.

Z wykresu tego wynika, że wieloskrzydłowy wiatrak amerykański posiada korzystny moment rozruchowy, większy od momentów rozruchowych pozostałych trzech typów. Moment

ozruchowy wiatraka amerykańskiego jest o wiele większy od momentu czynnego, t. j. od momentu w ruchu, wskutek czego nadaje się do pracy również przy słabych wiatrach. Wiatraki szybkobieżne przy mniejszych szybkościach posiadają moment rozruchowy o wiele mniejszy od momentu czynnego, dlatego też po zatrzymaniu się mogą być wprawione w ruch tylko przy silniejszym wietrze, co jest niekorzystne, zwłaszcza w braku stałego nadzoru.

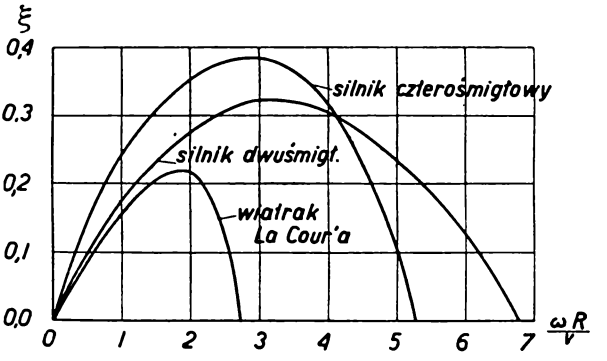


Rys. 27.

K. Bilau, na zasadzie przeprowadzonych przezeń doświadczeń również i nad modelami, podaje dla różnych typów wiatraków wartości ξ, przedstawione na rysunku 28.

Jak wynika z wykresu, największą wartość $\xi = 0{,}39$ wykazał czteroskrzydłowy silnik śmigłowy systemu Bilau'a; dla idealnego wiatraka La Cour'a $\xi_{max} = 0{,}21$.

Przy projektowaniu silników wietrznych Bilau proponuje przyjęcie następujących wartości spółczynnika ξ: dla wielo-



Rys. 28.

skrzydłowych amerykańskich $\xi = 0{,}1$; dla zwyczajnych czteroskrzydłowych $\xi = 0{,}2$ i dla silników śmigłowych $\xi = 0{,}4$.

Jak widzimy, dane Bilau'a w znacznej mierze różnią się od odpowiednich danych Sabinina: dla wieloskrzydłowych amerykańskich wiatraków Bilau podaje $\xi = 0{,}1$, Sabinin zaś 0,33. Możliwe, że Bilau, będąc sam konstruktorem silników szybkobieżnych, nie doceniał znaczenia wiatraków wieloskrzydłowych. W każdym bądź razie dane jego należałoby sprawdzić.

3. **Dane katalogowe.** Ciekawe jest zestawienie cyfr dotyczących wydajności wiatraków, podawanych przez firmy, zajmujące się konstruowaniem lub sprzedażą silników wietrznych.

Rozpatrzymy dla przykładu dane dla:

1) turbiny wietrznej 6-skrzydłowej „Sechsflug" (Hamburg);

2) turbiny wietrznej „Agricco" (Danja);

3) turbiny wietrznej wieloskrzydłowej „Herkules" (Niemcy).

W tablicach podano moc silnika na obwodzie koła w KM. Dane dotyczące silnika „Sechsflug" zawiera tablica 9.

TABLICA 9.

Średnica skrzydeł D m	Powierzchnia skrzydeł m²	Moc wiatraka w KM przy szybkości wiatru w m/sek					
		3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s
12	58	2	5	9	14	20	35
14	65	3	6	13	23	35	50
16	70	5	10	17	30	40	60
18	80	6	12	20	35	50	70

Obliczmy spółczynnik ξ według wzoru (54)

$$\xi = \frac{2L}{\sigma \pi R^2 v^3}$$

lub, ponieważ L dane jest w KM, ze wzoru

$$\xi = \frac{600}{\pi \cdot \sigma} \cdot \frac{L}{D^2 v^3} \cdot \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (55)$$

biorąc pod uwagę następujące dane katalogowe:

$$D = 18 \text{ m}; \quad v = 8 \text{ m/sek}; \quad \sigma = {}^1/_8; \quad L = 70 \text{ KM};$$

$$D^2 = 324; \quad v^3 = 512; \quad D^2 v^3 = 165\,888;$$

znajdziemy

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 70}{3{,}14 \times 165\,888} = 0{,}65 \; (> 0{,}5926).$$

Tablica 10 zawiera dane zaczerpnięte z katalogu „Agricco":

TABLICA 10.

Model	D w metr.	Powierzch. skrzydeł m^2	Moc w KM przy szybkości wiatru m/sek							Liczba skrzydeł
			4	5	6	7	8	9	10	
A_1	5,0	5,8	0,64	1,2	2,1	3,3	4,9	7,1	9,7	4
A_2	6,5	10,0	1,1	2,1	3,6	5,7	8,5	12,1	16,7	4
A_3	7,7	14,0	1,5	2,8	5,0	8,0	11,9	17,0	23,4	4
A_4	10,0	20,0	2,1	4,2	7,2	11,4	17,0	24,3	33,3	5
A_5	11,0	30,0	3,2	6,3	10,8	17,1	25,6	36,5	50,0	5
A_6	12,5	46,0	4,9	9,6	16,6	26,6	39,3	55,8	76,7	6

Obliczymy jak poprzednio spółczynnik ξ dla danych następujących: $D = 12{,}5$ m; $v = 10$ m/sek; $L = 76{,}7$ KM.

$$D^2 = 156{,}25; \quad v^3 = 1000; \quad D^2 v^3 = 156\,250;$$

$$\xi = \frac{600}{3{,}14 \times {}^1/_8} \cdot \frac{76{,}7}{156\,250} = 0{,}75 \; (> 0{,}5926)$$

dla $D = 11{,}0$ m; $v = 10$ m/s; $L = 50$ KM:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 50}{3{,}14 \times 121\,000} = 0{,}63 \; (> 0{,}5926).$$

Z rachunku wynika więc, że mocy podanej w katalogu odpowiada $\xi > \xi_{max} = 0{,}5926$, co jest niemożliwe.

Dla wiatraków „Herkules" mamy dane następujące:

TABLICA 11.

D w metrach	Moc w KM przy wietrze w m/sek		
	5	6 — 7	8
4	$^1/_2$	$1^1/_2$	2
6	$1^1/_2$	4	6
8	$2^1/_2$	6	10
10	4	8	14
12	6	14	20
15	10	25	36

Dla $D = 15$ m; $v = 8$ m/s; $L = 36$ KM:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 36}{3{,}14 \times 115\,200} = 0{,}47.$$

Dla $D = 8$ m; $v = 8$ m/s; $L = 10$ KM:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 10}{3{,}14 \times 512 \times 64} = 0{,}47.$$

Przytoczymy jeszcze dane dla wiejskiego, ale udoskonalonego wiatraka w Rosji według danych Każyńskiego.

TABLICA 12.

D w metr.	Moc w KM przy wietrze w m/sek				
	4	5	6	7	8
10	1,60	3,14	5,40	8,60	12,70
12	2,29	4,48	7,76	11,20	18,40
14	3,12	6,10	10,55	16,80	25,10
16	4,80	7,98	13,80	21,90	32,75
18	5,16	10,05	17,40	27,80	41,40
20	6,38	12,45	26,50	34,20	51,00

Dla $D = 20$ m; $v = 8$ m/sek; $L = 51$ KM:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 51}{3{,}14 \times 400 \times 512} = 0{,}39;$$

dla $D = 10$ m; $v = 6$ m/sek; $L = 5{,}4$ KM:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 5{,}4}{3{,}14 \times 500 \times 216} = 0{,}38.$$

W tablicy 13 zestawione są cyfry, które podaje inż. Każyński dla różnych wiatraków rosyjskich o średnicy $D = 17$ m

TABLICA 13.

Nr.	System wiatraka	Moc w KM przy wietrze w m/sek						
		4	5	6	7	8	9	10
1	Zwykły wiatrak wiejski	3,02	5,90	10,2	16,2	25,2	34,4	47,1
2	Wiejski wiatrak z udoskonalonemi skrzydłami	4,22	8,27	14,2	22,7	33,9	48,1	66,0
3	Wiatrak typu fabrycznego	5,43	10,6	18,2	29,0	43,4	61,7	84.6

Spółczynnik ξ dla każdego z wymienionych typów przy $D = 17$ m i $v = 10$ m/sek wyniesie odpowiednio:

dla 1-go $$\xi = \frac{600 \times 8 \times 47{,}1}{3{,}14 \times 289 \times 1000} = 0{,}25;$$

dla 2-go $$\xi = \frac{600 \times 8 \times 66}{3{,}14 \times 289 \times 1000} = 0{,}35;$$

dla 3-go $$\xi = \frac{600 \times 8 \times 84{,}6}{3{,}14 \times 289 \times 1000} = 0{,}45.$$

Wreszcie tablica 14 zawiera dane z katalogu Wind-Power (Kopenhaga-Danja) dotyczące czteroskrzydłowych wiatraków systemu „Mamouth".

TABLICA 14.

D w metr.	Moc w KM przy wietrze w m/sek							
	5	6	7	8	9	10	11	11,4 i wyżej
7	0,9	1,5	2,4	3,5	4,6	5,3	6,3	6,9
9	1,65	2,9	4,6	6,85	8,6	10,0	11,0	12,5
10	1,8	3,1	5,0	7,1	9,2	11,1	13,0	14,4
12	2,6	4,5	7,6	10,2	13,2	16,0	18,9	20,0
14	3,5	6,2	9,7	14,4	18,0	22,0	25,8	28,5
16	4,6	8,0	12,6	18,2	23,4	28,5	33,5	37,0
18	5,8	10,0	16,0	23,0	29,7	35,0	42,4	47,0

Tutaj dla $D = 16$ m; $v = 10$ m/sek; $L = 28{,}5$ KM; znajdujemy:

$$\xi = \frac{600 \times 8 \times 28{,}5}{3{,}14 \times 16^2 \times 1000} = \mathbf{0{,}17.}$$

4. **Spółczynniki wyzyskania energji wiatru.** Porównywując wszystkie wartości spółczynnika ξ, można zauważyć, że dane Bilau'a, zwłaszcza dotyczące typów wieloskrzydłowych, odbiegają znacznie od pozostałych. Dlatego też w dalszym ciągu nie będziemy z nich korzystali, lecz przyjmiemy jako przeciętne następujące wartości ξ:

1) dla wiatraków 4-skrzydłowych o konstrukcji udoskonalonej . $\xi = 0{,}17 - 0{,}20$;
2) dla wiatraków o 6-ciu i więcej skrzydłach . . . . . $\xi = 0{,}30 - 0{,}35$;
3) dla szybkobieżnych silników śmigłowych . . . . . $\xi = 0{,}40$.

. (55)

Po ustaleniu wartości spółczynnika ξ dla głównych typów silników wietrznych można wykonać obliczenia:

1) Ilości energji, którą można uzyskać w pewnej miejscowości z pomocą wiatraków tego albo innego systemu;

2) Głównych wymiarów wiatraka.

Zastanowimy się narazie nad kwestją pierwszą, do obliczenia zaś wymiarów wiatraka przystąpimy dopiero po zaznajomieniu się w głównych zarysach z konstrukcją wiatraków różnych typów.

5. **Rozporządzalna energja użyteczna wiatru.** Wiatry użytkowe obejmują trzy zakresy prędkości, mianowicie:

$$2 — 5 \text{ m/sek}; \quad 5 — 10 \text{ m/sek}; \quad 10 — 15 \text{ m/sek}.$$

Przedewszystkiem więc należy obliczyć prędkości przeciętne, odpowiadające przeciętnym ilościom energji wiatru wymienionych zakresów.

Ponieważ silniki wietrzne przy wiatrach o większej szybkości niż 10 m/sek zmniejszają automatycznie powierzchnię zakreślaną skrzydłami tak, że energja nie zwiększa się przy szybkościach większych od 10 m/sek, więc wszystkie wiatry 3-go zakresu należy przyjmować z szybkościami 10 m/sek. Przeciętną v' szybkość dla pewnego zakresu v_1—v_2 m/sek znajdujemy z zależności: $0{,}000835\, v'^3 (v_2 - v_1) =$

$$= \int_{v_1}^{v_2} 0{,}000835\, v^3 dv; \quad \text{skąd } v' = \sqrt[3]{\frac{v_2^4 - v_1^4}{4(v_2 - v_1)}} \; ^{1)} \quad . \; . \; . \quad (56)$$

Według ostatniego wzoru, przeciętna szybkość dla 1-go zakresu będzie:

$$v' = \sqrt[3]{\frac{5^4 - 2^4}{4(5-2)}} = 3{,}7 \text{ m/sek},$$

dla 2-go $$v' = \sqrt[3]{\frac{10^4 - 5^4}{4(10-5)}} = 7{,}8 \text{ m/sek},$$

dla 3-go $v' = \ldots = 10{,}0$ m/sek.

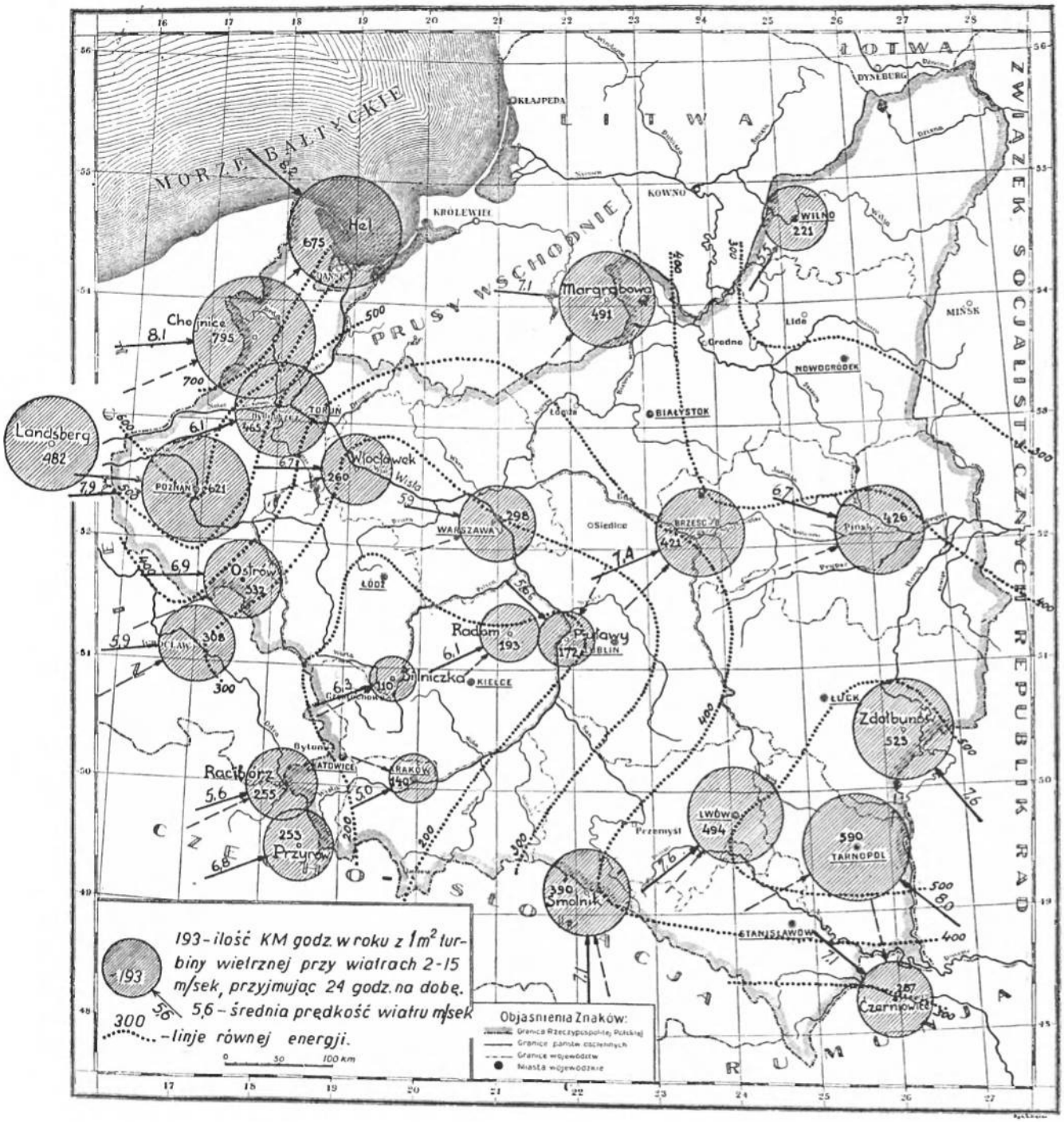
Przyjmujemy dalej, że spółczynnik $\xi = 0{,}33$. Wtedy energja z 1 m² powierzchni koła zakreślanego skrzydłami przy wyliczonych wyżej przeciętnych prędkościach wiatru wyniesie:

$$e_1 = 0{,}000835 \times 0{,}33 \times 3{,}7^3 \quad 0{,}01394 \text{ KM};$$
$$e_2 = 0{,}000835 \times 0{,}33 \times 7{,}8^3 = 0{,}12889 \quad ,,$$
$$e_3 = 0{,}000835 \times 0{,}33 \times 10{,}0^3 = 0{,}27500 \quad ,, \; .$$

---

[1]) Można też obliczać według wzoru:

$$v' = \sqrt[3]{(v_1^3 + v_2^3 + \ldots + v_n^3) \cdot \frac{1}{n}} \text{ m/sek} \quad . \; . \; . \; . \quad (56')$$


MORZE BAŁTYCKIE
ŁOTWA
LITWA
ZWIĄZEK SOCJALISTYCZNYCH REPUBLIK RAD
PRUSY WSCHODNIE
CZECHOSŁOWACJA
RUMUNJA
KŁAJPEDA
DYNEBURG
KOWNO
KRÓLEWIEC
WILNO
221
Hel
675
Margrabowa
491
Chojnice
795
Landsberg
482
Włocławek
260
POZNAŃ
621
TORUŃ
465
WARSZAWA
298
BRZEŚĆ
421
Pińsk
426
Ostrów
532
WROCŁAW
308
ŁÓDŹ
Radom
193
Puławy
172
Bilniczka
110
KIELCE
Zdołbunów
523
Racibórz
255
Przyrów
253
KATOWICE
KRAKÓW
140
LWÓW
494
TARNOPOL
590
Smolnik
390
STANISŁAWÓW
Czerniowce
287
Grodno
Lida
NOWOGRÓDEK
MIŃSK
BIAŁYSTOK
Siedlce
Pryzmyśl
Bytom
193 - ilość KM godz. w roku z 1m² turbiny wietrznej przy wiatrach 2-15 m/sek, przyjmując 24 godz. na dobę.
5,6 - średnia prędkość wiatru m/sek
300 - linje równej energji.
0 50 100 km
Objaśnienia Znaków:
Granica Rzeczypospolitej Polskiej
Granice państw ościennych
Granice województw
Miasta wojewódzkie

Rys. 29.

Następnie w celu obliczenia ilości KMgodzin w ciągu np. 1 roku należy ustalić, ile godzin w roku bywają wiatry poszczególnych zakresów. Całkowa krzywa liczby godzin daje możność wyznaczenia tej liczby dla odpowiedniej stacji.

Dla Warszawy otrzymujemy (nie korzystając z krzywej):

$$
\begin{array}{lllll}
L_1 = 45{,}5\% & \times\ 0{,}01394 & \times\ 365 & \times\ 24 = & 55{,}56 \text{ KMgodzin} \\
L_2 = 18{,}7\% & \times\ 0{,}12889 & \times\ 365 & \times\ 24 = & 211{,}12 \quad ,, \quad ,, \\
L_3 = \ \ 1{,}3\% & \times\ 0{,}275 & \times\ 365 & \times\ 24 = & 31{,}32 \quad ,, \quad ,, \\
\hline
\quad 65{,}5\% & & & \text{z } 1 \text{ m}^2 & 298{,}00 \text{ KMgodzin.}
\end{array}
$$

Przeciętną szybkość w okresie roku znajdujemy według wzoru:

$$v = \sqrt[3]{\frac{a v_a^3 + b v_b^3 + c v_c^3}{a + b + c}} \text{ [1]} \quad \ldots\ldots \quad (57)$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{45{,}5 \times 3{,}7^3 + 18{,}7 \times 7{,}8^3 + 1{,}3 \times 10^3}{45{,}5 + 18{,}7 + 1{,}3}} = \sqrt[3]{189} = 5{,}7 \text{ m/sek.}$$

W taki sam sposób można obliczyć zarówno ilość energji na 1 m^2 powierzchni koła, zakreślanego przez skrzydła wiatraka, jak też przeciętną szybkość w ciągu roku dla każdej stacji. Wyniki odpowiednich obliczeń podane są w tablicy 15.

Na podstawie powyższej tablicy została nakreślona mapka Polski (rys. 29), na której zaznaczone są odpowiednie ilości energji przy każdej stacji, linje jednakowych ilości energji oraz przeciętne kierunki i szybkości wiatrów.

Dła łatwiejszego porównania energji wiatru, przypadającej na poszczególne stacje, wykreślone zostały całkowe linje energji wiatru dla 7 stacyj (rys. 30).

Linje te dowodzą, że przy szybkości wiatru do 5 m/sek niema większych różnic między ilościami energji większości stacyj, przypadającemi na 1 m^2 powierzchni skrzydeł. Przy wiatrach silniejszych, różnica ta jednak staje się bardzo poważną. Z tego wynika, że silniki wietrzne powinny być takiej konstrukcji, ażeby mogły wykorzystywać energję wiatrów silniejszych. W obliczeniach i przy sporządzaniu wykresów przyjęto, że przy szybkościach wiatru od 10 do 15 m/sek energja silnika jest taka sama, jak przy szybkości 10 m/sek. Gdyby silnik mógł

---

[1]) Często przyjmuje się $v = (v_a' \,.\, a + v_b' \,.\, b + v_c' \, c) \dfrac{1}{a + b + c}$, gdzie a, b i c są % częstotliwości wiatrów pewnego zakresu.

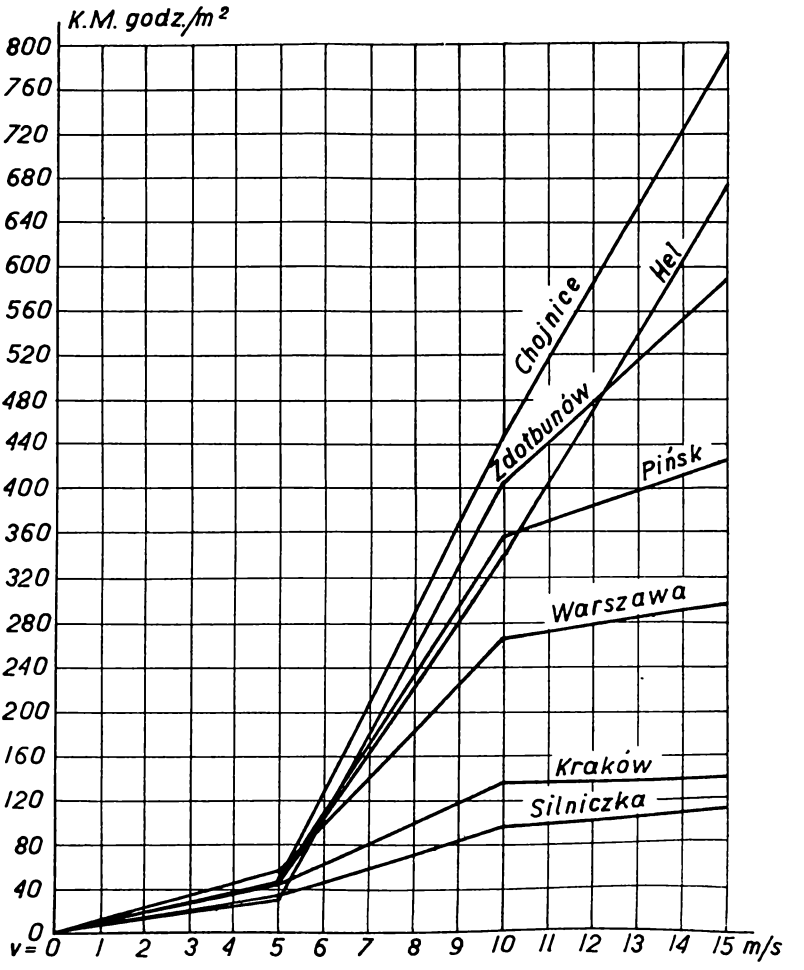
TABLICA 15.

№	Stacja	Grupy wiatrów w/g szybkości	% wiatrów	Ilość energji w roku z 1 m^2 zakreślanego przez skrzydła dla poszczególnych kategoryj wiatrów w KM	Suma energji wiatrów różnych kategoryj w roku w KM	Przeciętna szybkość w m/sek
1	Hel	2— 5 5–10 10–15	36,1 25,8 14,1	44 295 340	44 339 679	7,2
2	Wilno	2— 5 5—10 10—15	46,2 13,2 0,6	56 151 14	56 207 221	5,3
3	Chojnice	2— 5 5—10 10—15	38,3 35,4 14,3	47 404 344	47 451 795	7,2
4	Margrabowa (w Niemczech)	2— 5 5—10 10—15	48,5 22,2 7,4	59 254 178	59 313 491	6,4
5	Bydgoszcz	2— 5 5—10 10—15	46,5 22,4 6,4	57 256 154	57 313 467	6,3
6	Landsberg (w Niemczech)	2— 5 5—10 10—15	57,1 28,3 3,7	70 323 89	70 393 482	6,1
7	Włocławek	2— 5 5—10 10—15	30,0 13,4 2,9	37 153 70	37 190 260	6,1
8	Poznań	2— 5 5—10 10—15	35,6 28,0 10,7	43 320 258	43 363 621	7,0
9	Warszawa	2— 5 5—10 10—15	45,5 18,7 1,3	56 211 31	56 267 298	5,7
10	Brześć n/B	2— 5 5—10 10—15	30,6 27,0 2,9	37 259 125	37 296 421	6,7
11	Pińsk	2— 5 5—10 10—15	39,0 27,0 2,9	48 308 70	48 356 426	6,3
12	Wasilewicze (ZSSR)	2— 5 5—10 10—15	30,7 13,8 3,1	37 158 75	37 195 270	6,1

№	Stacja	Grupy wiatrów w/g szybkości	% wiatrów	Ilość energji w roku z 1 m² zakreślanego przez skrzydła dla poszczególnych kategoryj wiatrów w KM	Suma energji wiatrów różnych kategoryj w roku w KM	Przeciętna szybkość w m/sek
13	Ostrów	2— 5 5—10 10—15	35,0 15,0 4,9	43 171 118	43 214 332	6,2
14	Radom	2— 5 5—10 10—15	21,5 13,1 0,8	24 150 19	24 174 193	6,1
15	Puławy	2— 5 5—10 10—15	35,6 9,2 1,0	43 105 24	43 148 172	5,4
16	Wrocław	2— 5 5—10 10—15	59,5 16,4 2,0	73 187 48	73 260 308	5,4
17	Silniczka	2— 5 5—10 10—15	27,8 5,6 0,5	34 64 12	34 98 110	5,1
18	Zdołbunów	2— 5 5—10 10—15	23,7 33,1 4,8	29 378 116	29 407 523	7,0
19	Racibórz	2— 5 5—10 10—15	58,3 12,6 1,9	65 144 46	65 209 255	5,3
20	Kraków	2— 5 5—10 10—15	36,5 7,9 0,2	45 90 5	45 135 140	5,0
21	Lwów	2— 5 5—10 10—15	26,3 28,2 5,8	32 322 140	32 354 494	7,0
22	Tarnopol	2— 5 5—10 10—15	22,0 33,3 7,6	27 380 183	27 407 590	7,3
23	Smolnik	2— 5 5—10 10—15	28,7 23,3 3,7	35 266 89	35 301 390	6,7
24	Przyrów	2— 5 5—10 10—15	25,7 13,6 2,8	31 155 67	31 186 253	6,3
25	Czerniowce	2— 5 5—10 10—15	21,8 16,6 2,9	27 190 70	27 217 287	6,2

odpowiednio zwiększać swą pracę przy wiatrach szybszych od 10 m/sek, to ilość energji poważnieby wzrosła.

6. **Tunele aerodynamiczne**[1]). Doświadczenia z silnikami wietrznemi w naturalnej ich wielkości są bardzo uciążliwe i dlatego bardzo rzadko bywają wykonywane. O wiele wygodniej można prowadzić takie doświadczenia nad modelami



Rys. 30.

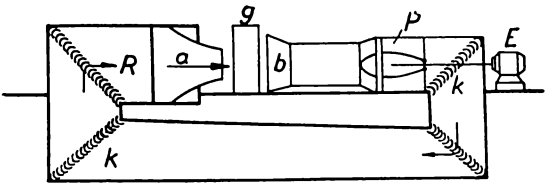
w specjalnych aerodynamicznych laboratorjach, stosując do badań sztuczny wiatr.

Pierwsze doświadczenia ze sztucznym wiatrem były dokonywane przez Rateau, który stosował swobodne wydmuchiwa-

[1]) Prof. Cz. Witoszyński: Aerodynamika, str. 227—235.

nie powietrza przez wentylatory w przestrzeń otwartą. Na drodze tej nie udało się jednak otrzymać dobrych wyników, gdyż strumień powietrza był nader nieprawidłowy i różnił się bardzo znacznie od przepływu jednostajnego, jaki należało osiągnąć. Wymaganiom tym zdołano zadośćuczynić dopiero przez ujęcie strumienia powietrza w kanały drewniane lub betonowe, zwane tunelami aerodynamicznemi.

Pierwsze tunele zostały zbudowane prawie jednocześnie przez Eiffel'a w Paryżu i Prandtl'a w Göttingen w 1908 r. Od tego czasu powstał cały szereg laboratorjów z tunelami najrozmaitszych typów. Opiszemy tutaj tylko następujące:



Rys. 31.

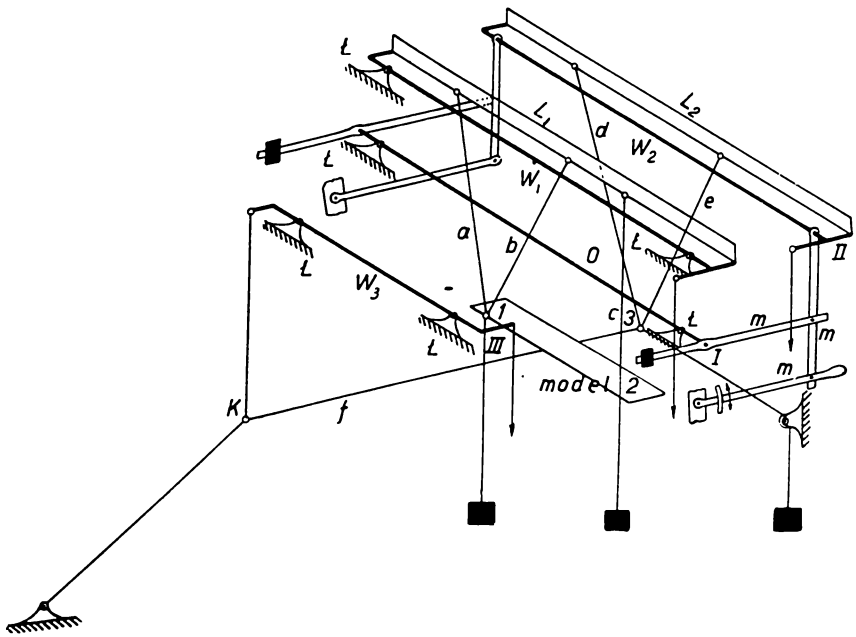
1) tunel Prandtla w Göttingen i 2) tunele Instytutu Aerodynamicznego w Warszawie (dwa).

Tunel Prandtla (rys. 31) ma zamknięty obieg powietrza. Ruch powietrza wywołuje wentylator P o średnicy skrzydeł 2,24 m, pędzony silnikiem elektrycznym E. Powietrze płynie tunelem, posiadającym przekrój około 20 m^2 i 4 zakręty. Dla uniknięcia zaburzeń i wirów na zakrętach, wykonano cztery kierownice łopatkowe (k, k). Przed wyjściem wiatru w przestrzeń pomiarową g tunel zwęża się do 4 m^2, dzięki czemu szybkość wiatru zwiększa się pięciokrotnie, osiągając 52 m/sek przy mocy silnika 430 KM. Badane modele mogą mieć średnicę do 60 cm.

W przestrzeni pomiarowej znajdują się t. zw. wagi aerodynamiczne. Są to przyrządy, służące do zawieszania modeli i do mierzenia sił, wywieranych na ten model przez strumień powietrza.

Urządzenie wagowe w Göttingen (rys. 32) posiada trzy odrębne wagi W_1, W_2 i W_3. Model jest umocowany na sześciu drutach a, b, c, d, e, f. Druty a, b, c są przytwierdzone w punktach 1, 2 przedniej krawędzi modelu i wiszą w jednej płaszczyźnie pionowej na listwie L_1, oddziaływającej na wagę W_1; podobnie druty d, e, przytwierdzone do modelu w punkcie 3 i leżące w płaszczyźnie pionowej równoległej do poprzedniej, wiszą na listwie L_2, oddziaływającej na wagę W_2. Obie grupy drutów przenoszą na wspomniane wagi składowe siły nośnej

w owych dwóch płaszczyznach pionowych. Drut *f*, przytwierdzony do przedniej krawędzi modelu w jej punkcie środkowym, jest poziomy i leży w płaszczyźnie symetrji; drut ten przenosi siłę poziomą (opór czołowy modelu) na punkt węzłowy *K*. W punkcie *K* zbiegają się jeszcze dwa inne druty, z których jeden (ukośny) jest zamocowany na stałe, a drugi (pionowy) przenosi odpowiednią składową oporu czołowego na wagę W_3. Druty *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* powinny być wszystkie stale naprężone; w tym celu mamy jeszcze trzy obciążone druty naprężające, przytwierdzone w punktach 1, 2, 3.



Rys. 32.

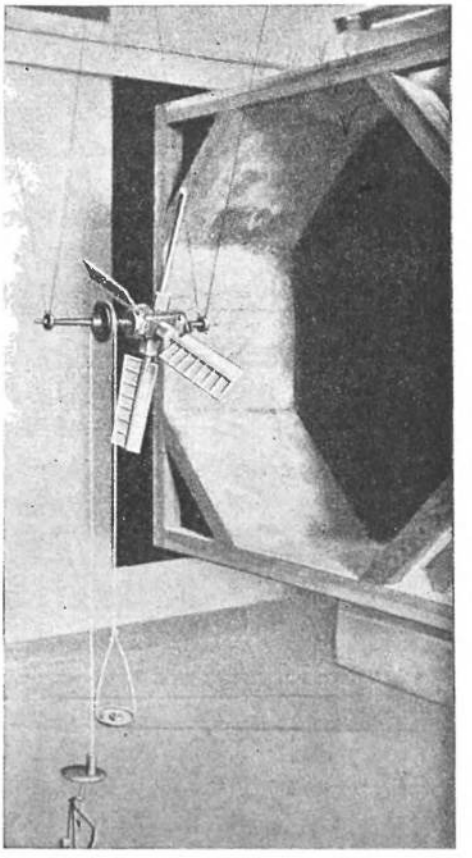
Każda z trzech wag może być albo unieruchomiona, przytem rola jej polega tylko na podtrzymywaniu drutów, albo też wyswobodzona i wtedy służy do właściwego pomiaru, który uskutecznia się przez nakładanie odważników na szalki (nie pokazane na rysunku). Jeżeli wyswobodzimy jednocześnie wagi W_1 i W_2, to możemy zmierzyć dwie siły pionowe, których suma stanowi siłę nośną. Luzując tylko wagę W_2, mierzymy moment względem przedniej krawędzi. Wreszcie wyswobadzając tylko wagę W_3, możemy znaleźć wartość oporu czołowego.

Cała waga W_2 może być obrócona dokoła W_1 o kąt dowolny przy pomocy mechanizmu *m-m-m*. Przytem punkty 1 i 2 po-

zostają w miejscu, a punkt 3 opisuje łuk w płaszczyźnie pionowej; w ten sposób można zmieniać kąt natarcia profilu.

Urządzenia do badania modeli skrzydeł wiatraka La Cour'a w tunelu aerodynamicznym w Göttingen są uwidocznione na rys. 33.

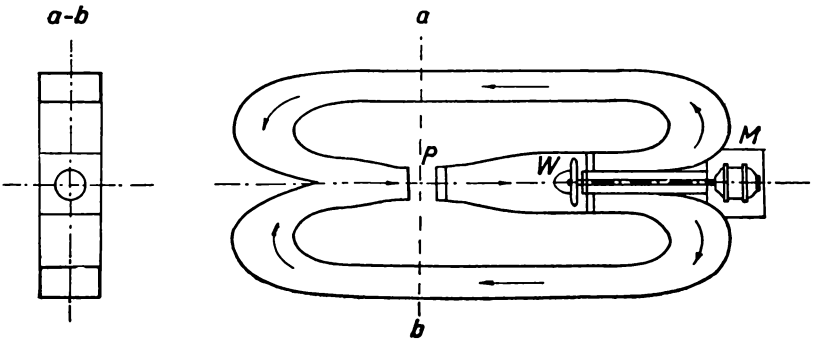
Tunele Instytutu Aerodynamicznego w Warszawie (rys. 34) pracują na podobnej zasadzie, jak tunel w Göttingen, od którego różnią się jednak odmiennem ukształtowaniem kanału. Mamy tu mianowicie dwa boczne kanały obiegowe, dzięki czemu układ jest symetryczny. Kształty tunelu są ustalone na podstawie obliczeń, które miały na celu osiągnięcie równomiernego przepływu bez użycia skomplikowanych kierownic. Średnica mniejszego tunelu wynosi 1 m, większego 2,5 m; w pierwszym osiąga się prędkość do 60 m/sek przy silniku o mocy 50 KM; w drugim prędkość przekracza 70 m/sek przy mocy silnika 500 KM.



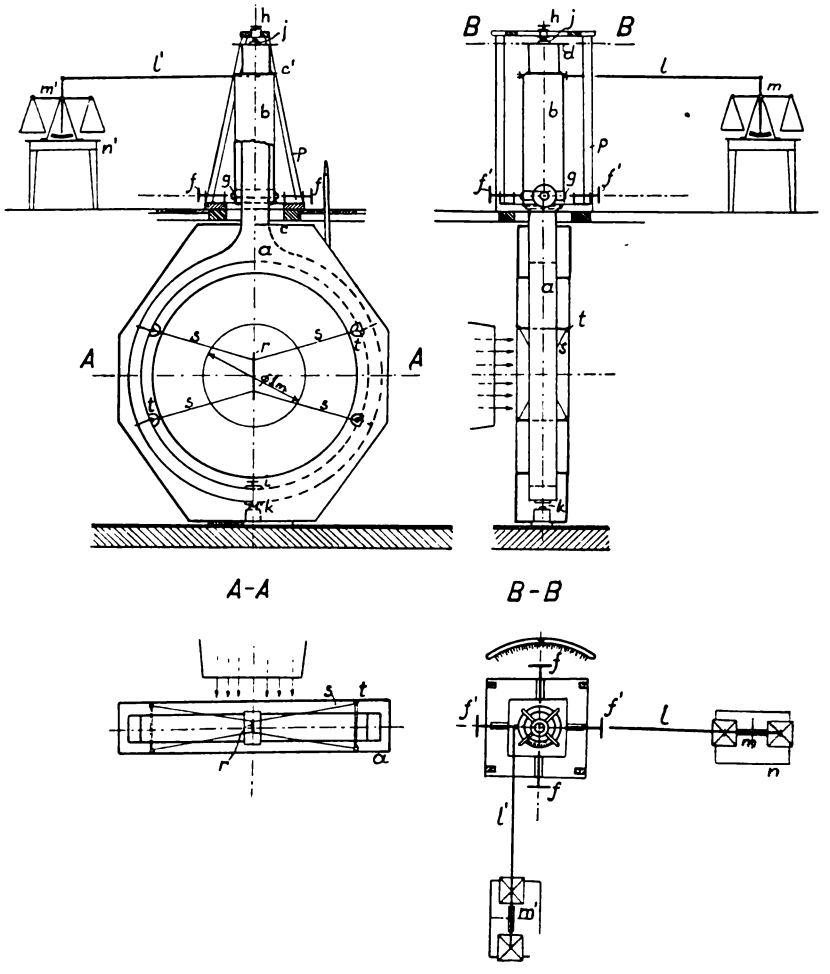
Rys. 33.

Urządzenie wagowe (rys. 35) odznacza się tem, że pozwala mierzyć oddzielnie siłę nośną, opór czołowy i moment, przyczem te trzy pomiary są zupełnie od siebie niezależne.

Model *r* umocowany jest w drewnianej ramie pierścieniowej *a* na czterech drutach *s*, dociąganych naprężaczami *l*. Rama posiada u góry przedłużenie rurowe, zawieszone w szerszej rurze *b* w ten sposób, że może być względem niej z pewnym wysiłkiem obracane. Na rurze *b* osadzony jest pierścień *g*, na którego obwodzie rozmieszczone są symetrycznie cztery gniazda z łożyskami kulkowemi. Naprzeciwko tych gniazd znajdują się



Rys. 34.



Rys. 35.

dwie pary przeciwległych trzpieni stalowych f,f i f',f' ze stożkowemi zakończeniami. Trzpienie posiadają gwinty i każdy z nich może być albo wprowadzony do swego gniazda, albo też zluzowany. Dzięki temu rura b wraz z ramą a i modelem może być zawieszona wahadłowo albo na osi $f-f$ (celem pomiaru oporu czołowego), albo na osi $f'-f'$ (celem pomiaru siły nośnej). W pierwszym przypadku moment oporu czołowego przenoszony jest za pośrednictwem drążka l na wagę szalkową m i może być łatwo zmierzony; w drugim przypadku podobną rolę odgrywają drążek l' i waga m'.

Rama a posiada jeszcze dwa pionowe łożyska kulkowe j, k z gniazdami, do których mogą być wsuwane trzpienie h, i. W ten sposób — po wyłączeniu obydwóch osi poziomych — rama otrzymuje możność obrotu dokoła osi pionowej. Stosujemy to przy pomiarze momentów, przyczem posługujemy się tą samą wagą m', która poprzednio służyła do mierzenia siły nośnej (ze względu na tę dodatkową rolę wagi m' drążek l' jest umocowany mimośrodowo na rurze b w przeciwieństwie do drążka l).

Kąty natarcia profilów można zmieniać w sposób bardzo prosty, mianowicie obracając całą ramę a z pomocą lewarka krzyżowego d; przytem kąty natarcia mierzone są na skali e.

7. **Prawo podobieństwa**[1]). Przy badaniach nad modelami powstaje kwestja, czy można wyniki tych badań stosować do objektów geometrycznie podobnych, jednakże wielokrotnie większych.

Z teorji prawa podobieństwa wiadomo, że jeżeli pomiar, wykonany na modelu o wymiarze l_1, przy gęstości powietrza σ_1, prędkości u_1 i spółczynniku lepkości powietrza μ_1 dał siłę P_1, zaś przy odpowiednio zmienionych wartościach l_2, σ_2, u_2, μ_2 siła jest P_2, to

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sigma_1 u_1^2 l_1^2 f(R_1)}{\sigma_2 u_2^2 l_2^2 f(R_2)}, \quad . \quad . \quad . \qquad (58)$$

gdzie R jest liczba Reynolds'a $= \frac{\sigma u l}{\mu}$.

Postać funkcji $f(R)$ nie jest znana. Więc wzór (58) stwierdza jedynie, że siła P jest proporcjonalna do gęstości σ, do kwadratu prędkości u i do kwadratu wymiaru linjowego l, o ile w porów-

[1]) Prof. Witoszyński: Aerodynamika str. 210—213. Prof. Szowheniw. Mechaniczna podibnist' w hydrotechnyci. 1927. Podiebrady. str. 1—29. Dr. Smetana: Mechanická podobnost v hydrodynamice, 1926.

nywanych przypadkach liczba R (wielkość oderwana) pozostaje niezmienna.

Jeżeli zaś $R_1 = R_2$, t. zn. $\frac{\sigma_1 u_1 l_1}{\mu_1} = \frac{\sigma_2 u_2 l_2}{\mu_2}$, to otrzymujemy

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sigma_1 u_1^2 l_1^2}{\sigma_2 u_2^2 l_2^2}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

Często przyjmuje się zamiast spółczynnika lepkości dynamicznego μ, spółczynnik lepkości kinematyczny $\nu = \frac{\mu}{\sigma}$ lub $\frac{\mu g}{\gamma}$; fizyczny wymiar ν jest $\frac{\text{cm}^2}{\text{sek}}$, wtedy

$$R = \frac{u l}{\nu} \quad (60)$$

Aby można było stosować prawo podobieństwa, musi być zatem

$$\frac{u_1 l_1}{\nu_1} = \frac{u_2 l_2}{\nu_2}. \quad (61)$$

Dla powietrza można przyjąć $\nu_1 = \nu_2 = \text{const} \cong 0{,}13$, wobec czego warunek poprzedni wyrazi się zależnością:

$$u_1 l_1 = u_2 l_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Widzimy, że dla zachowania prawa podobieństwa należałoby stosować prędkość doświadczalną wiatru tyle razy większą od prędkości użytecznego wiatru, ile razy model jest mniejszy od samego silnika wietrznego. Jeżeli skalę modelu przyjąć 1/10, to prędkość wiatru sztucznego powinna byłaby być 10 razy większa od prędkości wiatru naturalnego. Z tego wynika, że w istniejącym np. tunelu Politechniki Warszawskiej, w którym można osiągnąć prędkość do 70 m/sek, dałoby się dokonać badanie nad modelem wiatraka ze skrzydłami o średnicy do 10 metrów i przy warunkach naturalnego wiatru z prędkościami do 7 m/sek. Dla większych skrzydeł, o średnicy np. do 20 m, skala modelu powinna byłaby być około 1/20, wtedy zaś prędkość sztucznego wiatru, odpowiadającego naprz. naturalnemu 8 m/sek, wynosiłaby około 160 m/sek, co jest niewykonalne.

W celu zmniejszenia prędkości sztucznego wiatru należałoby zmniejszyć spółczynnik ν_2 w porównaniu ze spółczynnikiem ν_1 dla zwykłego powietrza. Osiągnąć to można albo przez zastosowanie wody zamiast powietrza (dla wody $\nu \cong 0{,}018$), albo przez sprężone powietrze (dla powietrza sprężonego do 10 atm spółczynnik ν jest około 10 razy mniejszy); jednak

w praktyce wszystko to związane jest z wielkiemi trudnościami, dlatego też badać można modele jedynie niezbyt wielkich silników, co jednak nie zmniejsza doniosłego znaczenia tego sposobu badania.

ROZDZIAŁ IV.

Wiatraki wiejskie.

Przegląd historyczny i podział silników wietrznych.—Wiatraki wiejskie o budowie stojakowej (typ niemiecki).—Wiatraki typu holenderskiego. Wady wiatraków wiejskich.—Wiatraki wiejskie udoskonalone.

1. **Przegląd historyczny i podział silników wietrznych.** Wiadomości o wyzyskaniu siły wiatru z pomocą wiatraków sięgają czasów zamierzchłych: już przed 3000 lat budowano wiatraki w starożytnym Egipcie, w Persji znano je w VII wieku po Nar. Chrystusa; znacznie później zjawiają się wiatraki we Francji — w r. 1105, następnie w Anglji — w r. 1140, we Włoszech — w r. 1337, w Holandji — w r. 1439, w Niemczech — w r. 1393.

Budowę najdawniejszych wiatraków wyjaśniają ryciny z XVII i XVIII stuleci. Są to zazwyczaj małe budynki, ustawione na pięciu nogach, ułożonych stożkowo, zaopatrzone w cztery wykrzywione skrzydła. Konstrukcja ta jest również pierwowzorem używanych w Polsce wiatraków, obracanych w całości dokoła mocnego pionowego słupa, zakopanego głęboko w ziemię lub wspartego na czterech belkach, związanych w kształcie krzyża i ułożonych na gruncie, umocnionym kamieniami. W Holandji, począwszy od roku 1650, rozpowszechnił się inny typ młynów z obracającą się dokoła osi pionowej tylko górną częścią budynków, stanowiącą wraz z dachem t. zw. czapę.

Budowa holenderska z budynkiem nieruchomym a obracanym dachem pozwala na znaczne powiększenie wymiarów wiatraka oraz długości jego skrzydeł.

W Polsce używane są przeważnie wiatraki typu holenderskiego, jednakże można jeszcze w wielu miejscach spotkać wiatraki w całości ruchome dokoła pionowego słupa t. zw. „króla".

Wielką wadą wymienionych wyżej konstrukcyj jest konieczność ciągłego śledzenia kierunku i siły wiatru oraz odpowiedniego ustawiania wiatraka.

Udoskonalenia wiatraków w dalszym ich rozwoju miały na celu, poza wzmocnieniem i ulepszeniem całej budowy, przede-

wszystkiem zapewnienie im samoczynnej nastawności. Pierwszy wiatrak samonastawny, zależnie od kierunku wiatru, ukazał się w Paryżu w r. 1780, w Niemczech zaś w r. 1791.

Następnie zaczęto budować wiatraki o skrzydlach rozmaitej konstrukcji w układzie poziomym. Dzięki swej prostocie w porównaniu z wiatrakami typu niemieckiego i holenderskiego, wiatraki te wzbudziły dość duże zainteresowanie. Jednakże zarówno teorja, jak i doświadczenie, dowiodły wkrótce, że budowa ta jest mniej racjonalna od konstrukcji z ustawieniem skrzydeł w płaszczyźnie prawie pionowej, bliskiej położenia prostopadłego względem kierunku wiatru, wobec tego układ poziomy skrzydeł w budowie wiatraków został dziś niemal zupełnie zaniechany, aczkolwiek w odpowiednich warunkach posiada pewne zalety, o czem zresztą będzie mowa w dalszym ciągu.

Z biegiem czasu zaczęto stosować w budowie wiatraków konstrukcje żalazne, znacznie lżejsze, a więc z mniejszemi przy obrocie oporami tarcia. W celu zapewnienia samonastawności, część ruchomą wiatraka zaopatrzono w długi ster, umieszczony w płaszczyźnie wału głównego prostopadle do tarczy roboczej.

Przyrząd ten, dziś jeszcze powszechnie używany, jest za słaby do pokonywania większego obciążenia kół zębatych młyna, do przezwyciężania więc większych oporów przy obrocie zastosowano t. zw. wiatraczki sterowe, czyli jeden lub dwa wiatraki pomocnicze, ustawione w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny steru. Wiatraki te, rozwijając moc wystarczającą do pokonania oporu, obracają wiatrak do pozycji odpowiadającej kierunkowi wiatru za pośrednictwem przekładni kół zębatych oraz zębatki, umieszczonej na obwodzie części nieruchomej wiatraka. Opisane urządzenie sterowe stosuje się dziś zarówno do wiatraków holenderskich, jak i nowoczesnych.

W pierwszej połowie XIX wieku, wobec rozwoju silników parowych, zagadnienie wyzyskania energji wiatru zeszło na plan dalszy. Obecnie w zagadnieniach energetycznych największą rolę odgrywają silniki cieplne (parowe, gazowe, ropowe i t. p.) oraz silniki elektryczne. Silniki wietrzne, dzięki temu, iż pod względem równomierności pracy ustępują pozostałym, mogą konkurować z innemi tylko w szczególnych warunkach i w nowoczesnem, udoskonalonem wykonaniu.

Po wystawie powszechnej w Filadelfji w r. 1876 zwrócono ponownie uwagę na silniki wietrzne, mianowicie na nowe sil-

niki Halladay'a i Corcoran'a z zadowalająco rozwiązaną samonastawnością wiatraków zależnie zarówno od kierunku wiatru, jak i jego siły.

Od tego czasu rozpoczyna się nowy okres w rozwoju budownictwa wiatraków, przeważnie typu wieloskrzydłowego, z różnemi odmianami w konstrukcji skrzydeł i mechanizmów.

Najwięcej silników wietrznych wyrabia obecnie Ameryka, następnie Niemcy i Danja. Jako bardziej znane typy, należy wymienić wiatraki: Halladay (U. S. A.), Eklips-Corcoran (U.S.A.) Giant (U. S. A.), Sechsflug (Danja), Herkules (Drezno), Agricco (Danja), Adler (Holstein) Mammuth (Danja), silniki śmigłowe-Bilau (Berlin), Ikar (Inowrocław).

Wraz z rozwojem aeronautyki i powstaniem aerodynamicznych pracowni rozpoczął się nowy etap w budownictwie silników wietrznych; cechują go poszukiwania racjonalnych kształtów skrzydeł, czyniących zadość wymaganiom aerodynamiki, udoskonalenie wiatraka wieloskrzydłowego o małym wprawdzie momencie rozruchowym, lecz większym spółczynniku wyzyskania energji wiatru, zastosowanie siły wiatru do wytwarzania prądu elektrycznego i wreszcie próby zastosowania prawa Magnusa do silników wietrznych.

Przejdziemy teraz do omówienia najważniejszych rodzajów wiatraków istniejących.

Istniejące silniki wietrzne można podzielić na trzy główne grupy, mianowicie:

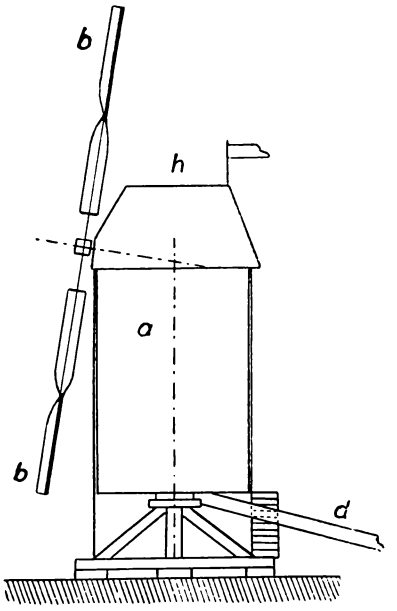
1. Silniki o skrzydłach obracających się pod działaniem siły nośnej wiatru przeważnie w płaszczyźnie prawie prostopadłej do kierunku wiatru.
2. Silniki o skrzydłach obracających się pod działaniem siły oporu wiatru.
3. Silniki z walcami lub półwalcami zamiast skrzydeł (system rotorowy).

Do grupy pierwszej należą wiatraki: a) zwykłe starszej konstrukcji z małą liczbą (najczęściej 4) dużych skrzydeł o kształtach prostych (ustrój stojakowy, albo niemiecki oraz system holenderski), b) nowoczesne, przeważnie o dużej liczbie skrzydeł, tworzących wirnik (wiatraki amerykańskie i duńskie), zwane turbinami wietrznemi, c) szybkobieżne, czyli śmigłowe z małą liczbą skrzydeł o profilach aerodynamicznych (silnik Bilau'a, wiatrak Instytutu Aerodynamicznego w Rosji).

Drugą grupę można podzielić na wiatraki: a) o osi obrotu poziomej i b) o osi pionowej.

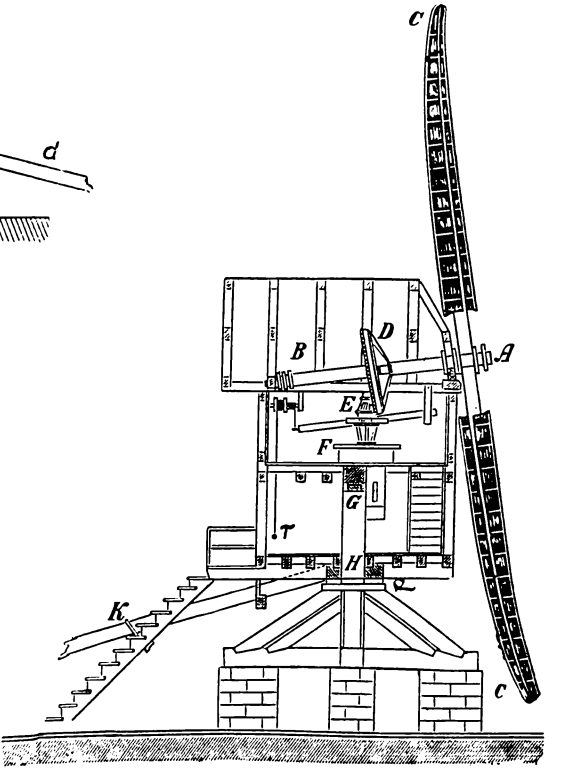
Z grupy trzeciej omówimy tylko a) wiatraki Fletnera o skrzydłach walcowych i b) wiatraki Savoniusa z osią pionową.

2. **Wiatraki wiejskie o budowie stojakowej (typ niemiecki).** Wiatraki tego typu (rys. 36, 37 i 38) stosowane są dziś jeszcze we wschodnich województwach Polski.



Rys. 36.

Cechę charakterystyczną wiatraka tego typu stanowi powiązanie w jedną całość skrzydeł *b* (rys. 36) z budynkiem *a* i dachem *h*. Cały młyn może obracać się dokoła środkowego słupa, bądź wspartego na podstawie (stojaku) z belek (rys. 37),

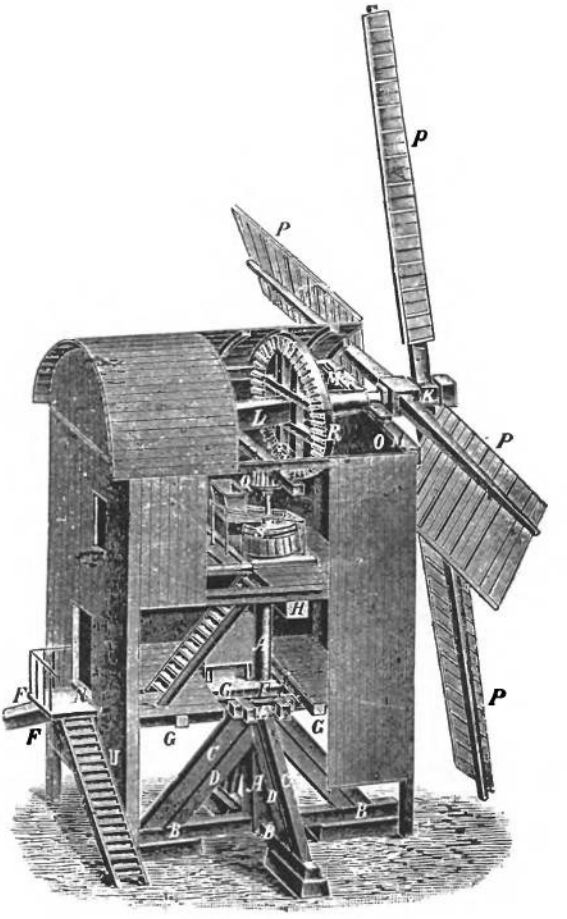


Rys. 37.

bądź też, jak się zdarza, zakopanego głęboko w ziemię, przyczem dno dołu wyłożone jest kamieniami. Dolny koniec słupa wykonywa się o przekroju kwadratowym, górny zaś o przekroju okrągłym. Okręcanie młyna odbywa się zapomocą dźwigni *k*, zamocowanej pomiędzy belkami ślizgacza *GF* (rys. 37 i 38). Dźwignię *k* uruchamia się zapomocą przenośnej wciągarki, t. zw. „barana", którą przymocowuje się zależnie od potrzeby do jednego ze słupów, zakopanych w liczbie 10 do 12

dokoła młyna. Powierzchnie ślizgowe smaruje się zazwyczaj mydłem.

Wał skrzydłowy AB (rys. 37 i 38), najczęściej drewniany, czasem żelazny, pochylony do poziomu pod kątem około 10^0 do 15^0, wsparty jest na dwóch czopach. Pochylenie osi wału ma na celu osiągnięcie prostopadłości płaszczyzny skrzydeł względem kierunku wiatru, który wieje zazwyczaj pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni ziemi. Prócz tego, dzięki pochyleniu wału AB, skrzydła CC (rys. 37) są bardziej oddalone u dołu od osi młyna, pozwalając na wykonanie większego fundamentu.

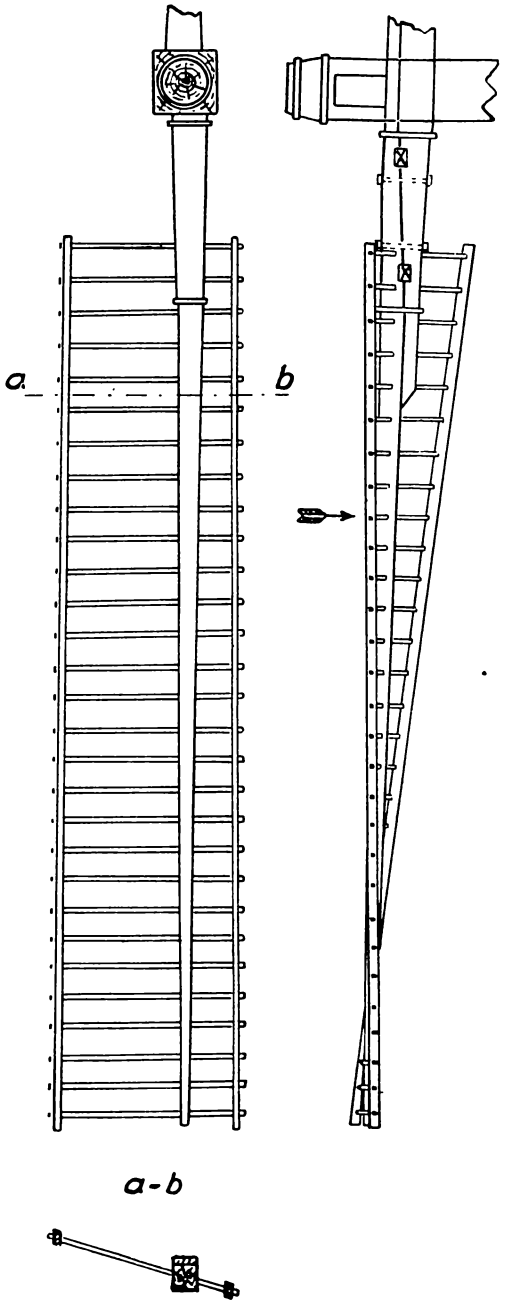


Rys. 38.

W zakończeniu wału A zamocowane są pod kątem prostym względem siebie 4 ramiona o długości od 5 do 10 metrów i wymiarach przekroju poprzecznego od 25×20 cm do 30×25 cm. W ramionach osadza się w odstępach równych 40 do 50 cm poprzeczki czyli t. zw. żebra, których końce łączy się zapomocą dyli, równoległych do ramion. W ten sposób powstaje szkielet skrzydeł, który następnie pokrywa się drewnianemi płatami lub płóciennemi żaglami. Wielkość powierzchni czynnej skrzydeł można dostosowywać do siły wiatru przez odpowiedni dobór ilości płatów lub zmianę rozpostarcia płócien.

Skrzydła ustawia się zawsze skośnie względem płaszczyzny prostopadłej do osi wału, bowiem przy ułożeniu ich w tej

płaszczyźnie parcie wiatru, nie wywołując obrotu wiatraka, wywierałoby tylko nacisk osiowy na wał i skrzydła, zginając te ostatnie. W najprostszych młynach kąt odchylenia powierzchni skrzydła od płaszczyzny prostopadłej do osi wału jest jednakowy na całej długości skrzydła i wynosi zazwyczaj od 12^0 do 18^0. Poprzeczki więc tworzą z kierunkiem wiatru kąt 78^0 do 72^0.



Rys. 39.

Jednakże, w myśl rozważań teoretycznych, w celu uzyskania większej wydajności wiatraka, kąt, który tworzą skrzydła z płaszczyzną prostopadłą do osi wału skrzydłowego, powinien posiadać wartość zmienną, malejącą w kierunku od wału ku końcom skrzydeł. W ten sposób zbudowane skrzydło nie jest płaskie, lecz tworzy powierzchnię zwichrzoną (rys. 39).

Ruch obrotowy wału AB przenosi przekładnia kół zębatych stożkowych D (rys. 37) lub R (rys. 38) i E na wał pionowy, połączony z górnym kamieniem młyńskim.

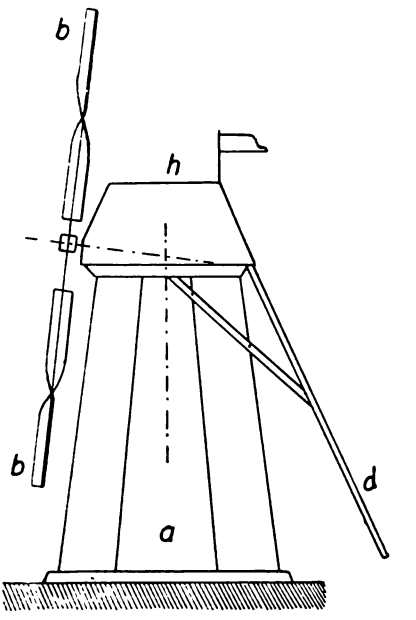
Ogólny widok młyna typu omawianego przedstawia rys. 38. Na krzyżowej podstawie BB wspiera się główny słup AA, umocniony

podporami z belek; na końcu słupa zamocowane jest siodło E utworzone z czterech belek. Na wygładzonej powierzchni tych ostatnich spoczywa i obraca się cały budynek młyna. Słup A uchwycony jest ponad siodłem przez dwa podłużne dyle F, do których przymocowana jest dźwignia F_1, oraz dwa poprzeczne g. Wał KL spoczywa w łożysku przymocowanem do belki ramy M. W głowicy wału osadzone są cztery ramiona skrzydeł P. Przekładnia kół zębatych R i Q przenos ruch obrotowy wału skrzydłowego na wał pionowy i kamień S.

Ze względu na umożliwienie swobodnego skręcania młyna schodki umieszczone nazewnątrz nie sięgają powierzchni ziemi.

Na rys. 37 uwidoczniony jest hamulec, służący do zmniejszania prędkości obrotu skrzydeł lub zupełnego ich hamowania. W najprostszem wykonaniu hamulec ten stanowi pierścień z miękkiego drzewa, zaciskany z różną siłą na obwodzie koła D zapomocą liny T.

3. **Wiatraki typu holenderskiego.** Zasadnicza różnica pomiędzy wiatrakami poprzednio opisanemi a silnikami o budowie holenderskiej polega na ustawieniu budynku a na stałym fundamencie, podczas gdy część obrotową stanowi tylko górna część młyna h zwana czapą (rys. 40 i 41).



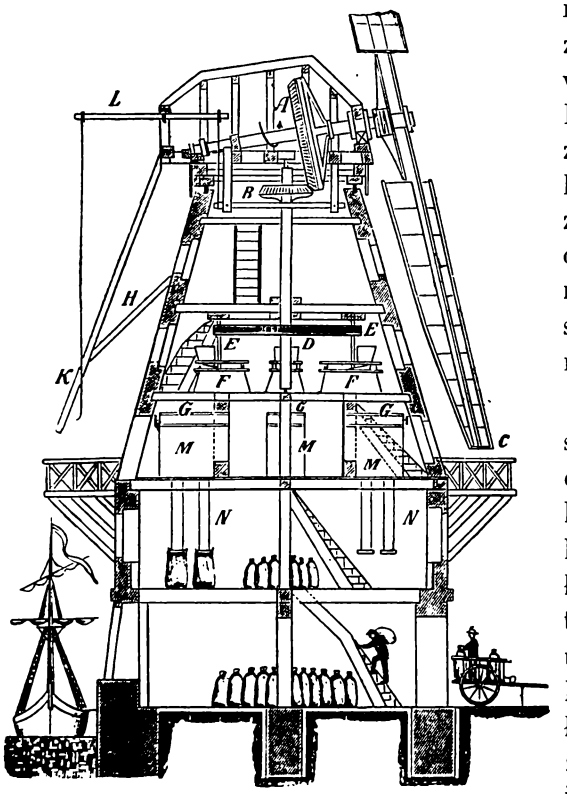
Rys. 40.

Młyny typu holenderskiego mogą posiadać znaczną wysokość, dzięki czemu nadają się szczególnie w przypadkach, gdy urządzenia wewnętrzne wymagają dużo miejsca. Rys. 41 przedstawia przekrój wielkiego młyna holenderskiego. Ruch obrotowy skrzydeł przenoszą koła A i B na wał pionowy, umieszczony ściśle w osi obrotu czapy. Ta ostatnia wsparta jest na rolkach toczących się przy jej obrocie po szynie obwodowej, uruchamiana zaś jest zapomocą dźwigni H, której dolny koniec sięga do otaczającej młyn galeryjki. Z galerji tej można również regulować przysłonięcie skrzydeł zapomocą pła-

tów lub żagli oraz hamować ruch wału skrzydłowego z pomocą liny *K*. Koło zębate *D* uruchamia trzy postawy młyńskie *E*.

Inne szczegóły budowy młyna widoczne są na rysunku. Skrzydła młyna holenderskiego składają się również z ramion, żeber i poszycia, t. j. deszczułek lub żagli. Budowę takiego skrzydła wyjaśnia rys. 42.

Kąt odchylenia żeber od płaszczyzny ramion obiera się zazwyczaj na podstawie doświadczenia osiągniętego w warunkach miejscowych, nie zaś zgodnie z teorją i wzorem Maclaurin'a. Kąt ten dla żebra znajdującego się najbliżej wału wynosi zwykle 20^0 do 30^0, dla ostatniego zaś tworzącego zakończenie skrzydła 0^0, a czasem nawet — 6^0.



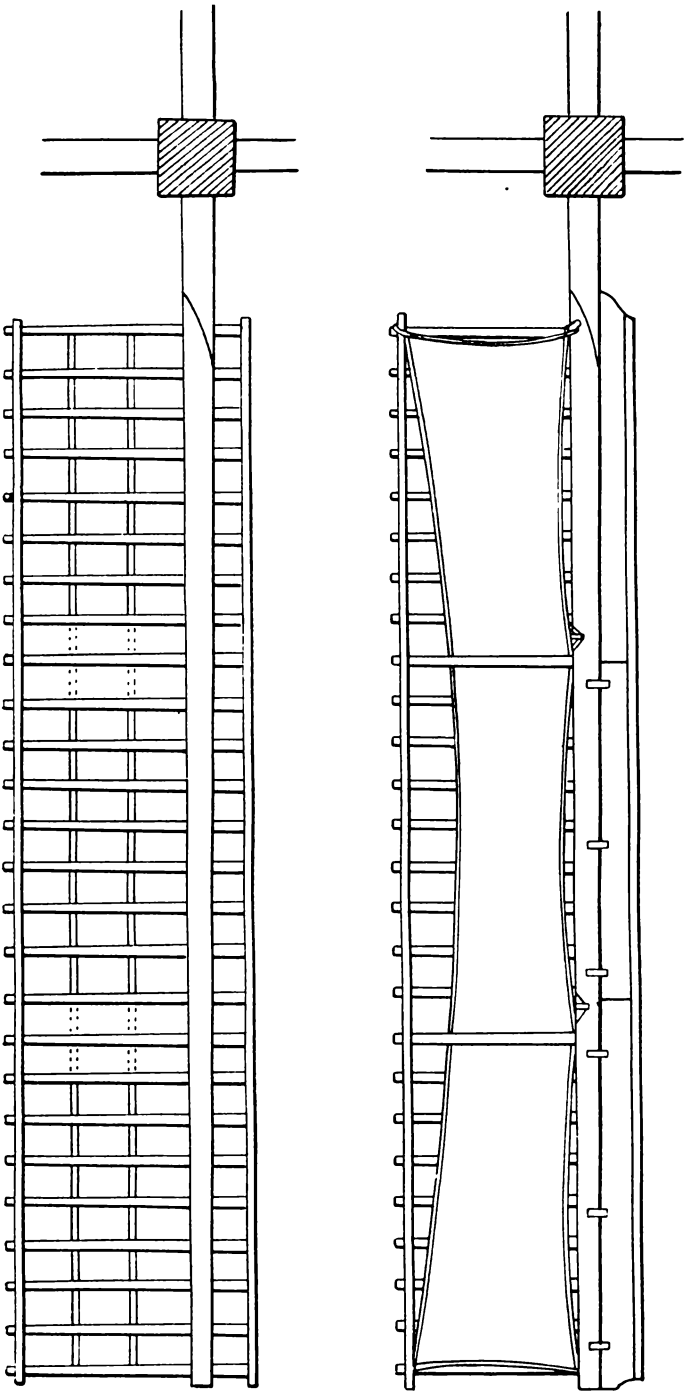
Rys. 41.

Regulacja prędkości wirowania skrzydeł w młynach holenderskich starszych konstrukcyj odbywała się ręcznie, przytem często musiano używać do pomocy hamulca, co pociągało za sobą szybkie zużywanie się wału oraz innych części urządzenia.

W młynach nowoczesnych stosuje się już obecnie regulację samoczynną, o której będzie mowa w opisie typów bardziej doskonałych.

4. **Wady wiatraków wiejskich.** Wiatraki obu opisanych typów stosowane są w Polsce do czasów obecnych i, dzięki stosunkowej prostocie swej budowy, z pewnością długo jeszcze będą w użyciu. Jednakże w wielu przypadkach budowa ich i wykonanie bywają nader wadliwe, mianowicie:

Kształt, wygięcia i poszycie skrzydeł częstokroć nie od-



Rys. 42.

powiadają wymaganiom teorji. Zdarza się np., że w celu ułatwienia rozruchu zwichrzenie skrzydeł zmniejsza się w kierunku od końców ku osi wału; wskutek czego końce skrzydeł stawiają duży opór wentylacyjny przy obrocie, co pociąga za sobą zmniejszenie mocy wiatraka. Duże wymiary skrzydeł wiatraków wiejskich, dochodzące do 25 m długości, mają za zadanie wyrównanie straty mocy spowodowanej niewłaściwemi krzywiznami. Jednakże wraz ze wzrostem wymiarów skrzydeł rośnie również ich ciężar tak, iż waga czterech skrzydeł przekracza często 4000 kg. Nadto ramiona wypadają bardzo grube, dzięki czemu stwarzają dodatkowy opór przy obrocie, zmniejszający moc wiatraka. Z kolei wał skrzydłowy, dźwigający tak ciężkie ramiona, musi posiadać odpowiednio duże wymiary. Średnica wału dochodzi do 1 m, ciężar zaś przekracza często 2000 kg. Przy tak dużych wymiarach skrzydeł i wału całkowity ciężar wału wraz ze skrzydłami i kołem zębatem dochodzi do 6000 — 7000 kg. Wobec lichego wykonania łożysk, opory mechaniczne pochłaniają prawie połowę energji wiatru, przejętej przez skrzydła, przy słabych zaś wiatrach o prędkości 2 — 3 m/sek praca wiatraka staje się wręcz niemożliwą.

Wielką wadą wiatraka wiejskiego jest jego mała obrotność, nie pozwalająca na natychmiastowe dokładne ustawianie go odpowiednio do dość często zmiennego kierunku wiatru. I ten wzgląd częściowo zmuszał wieśniaków do wykonywania skrzydeł możliwie wielkich. Z drugiej strony jednak, im większe są skrzydła, tem trudniejsze staje się kierowanie wiatrakiem. W praktyce okręcanie wiatraka dokonywa się najczęściej zapomocą wciągarki, lub nawet z pomocą koni. Bez użycia odpowiednich urządzeń wiatrak może obrócić tylko 12 — 15 ludzi. Wskutek trudności związanych z nastawnością wiatraka, a więc niedostatecznej przystosowalności jego do zmiennego kierunku wiatru, część energji wiatru przepada niewykorzystana.

Bardzo często można spotkać się z niewłaściwem ustawieniem wiatraka w terenie, np. wpobliżu drzew lub budynków, tamujących podmuch wiatru, co staje się częstokroć powodem znacznego zmniejszenia wydajności wiatraka.

Dzięki wymienionym, okolicznościom wiatraki wiejskie posiadają zazwyczaj małą wydajność oraz małą liczbę dni i godzin pracy w ciągu roku (około 600 — 800 godzin pracy w przeciągu 100 dni w roku).

5. **Wiatraki wiejskie udoskonalone.** Najbardziej racjonalne wyzyskanie energji wiatru można osiągnąć, stosując

współczesne udoskonalone silniki wietrzne o specjalnych kształtach.

Wobec jednak dość wysokich kosztów silników nowoczesnych, w pewnych warunkach opłaca się budowa wiatraków o konstrukcji prostej (typu niemieckiego lub holenderskiego), przytem wszakże koniecznem staje się wprowadzenie możliwie licznych ulepszeń.

Przedewszystkiem trzeba zwrócić uwagę na bardziej racjonalną budowę skrzydeł, t. j. na dobór odpowiednich szerokości i krzywizn oraz na zmniejszenie wymiarów skrzydeł.

Następnie należy udoskonalić wał główny i mechanizm przekładni.

Ręczne okręcanie młyna winno być zastąpione samoczynnem.

Należy również wziąć pod uwagę właściwy wybór miejsca oraz odległości wału skrzydłowego od ziemi.

Wreszcie konieczne jest zabezpieczenie wiatraka od uszkodzenia wskutek uderzenia pioruna.

W Rosji budowane są obecnie przez Instytut Aerodynamiczny zwykłe wiatraki o konstrukcji udoskonalonej w myśl wymienionych zasad.

Ze względu na to, że ten sposób budowy może znaleźć zastosowanie również w Polsce, przytoczę dla przykładu opis konstrukcji tak udoskonalonego wiatraka.

Długość skrzydeł wiatraka wynosi 5 m (czyli rozpiętość skrzydeł równa jest 10 m). Moc silnika przy prędkości wiatru 6 m/sek wynosi 5,4 KM. Ramię skrzydła wykonywa się z dobrego o prostych słojach pnia jodłowego lub sosnowego, długości conajmniej 6 m. Pień taki obrabia się w celu nadania mu przekroju kwadratowego lub okrągłego, przytem po obróbce cieńszy koniec dyla winien mieć grubość przynajmniej 15 cm, grubszy zaś, lub też środek ramienia podwójnego, conajmniej 20 cm. Drzewo na ramiona należy wybierać możliwie suche, o włóknach prostych, bez sęków i szczególnych skaz.

Po obróbce na ramieniu oznacza się miejsca na gniazda lub otwory, w których zostaną zamocowane żebra pod różnemi kątami względem płaszczyzny obrotu skrzydła, zależnie od odległości żebra od osi wału.

Wartości tych kątów bądź wylicza się ze wzoru Maclaurain'a, bądź też przyjmuje się, wzorując się na dobrze pracujących skrzydłach.

Schwahn, naprzykład, podaje następujące wartości kąta β między żebrami i płaszczyzną obrotu:

TABLICA 16.

Długość skrzydła, liczona od osi wału, m	Liczba żeber	Kąt β dla pierwszego żebra
9,5—10	20—22	20°—22°
11,5—12	24—26	24°—26°
12,5—13	28—30	28°—29°
13,5—14	31—32	29°—30°

Dla ostatniego żebra, t. j. na końcu skrzydła, Schwahn przyjmuje $\beta = -2^{\circ}$, dla przedostatniego zaś $\beta = 0^{\circ}$.

Instytut Aerodynamiczny k. Moskwy zastosował następujące kąty i wymiary:

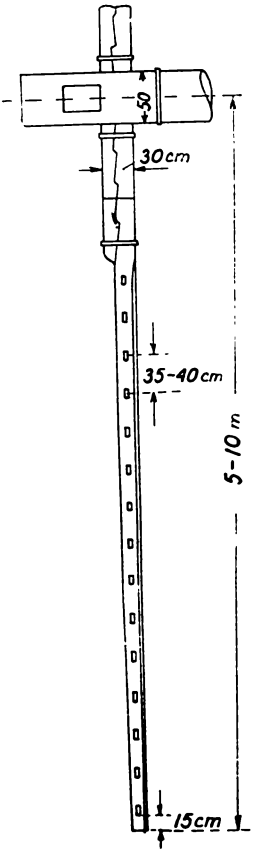
TABLICA 17.

Kolejność żeber	Odległość żebra od osi wału, m	β°	Grubość ramienia mm
1	5,00	11°24′	147,5
2	4,50	12°15′	151,0
3	4,00	13°28′	155,0
4	3.50	14°40′	159,0
5	3,00	16°26′	161,0
6	2,50	18°27′	165,0
7	2,00	20°54′	169,0
8	1,25	25°—	175,0

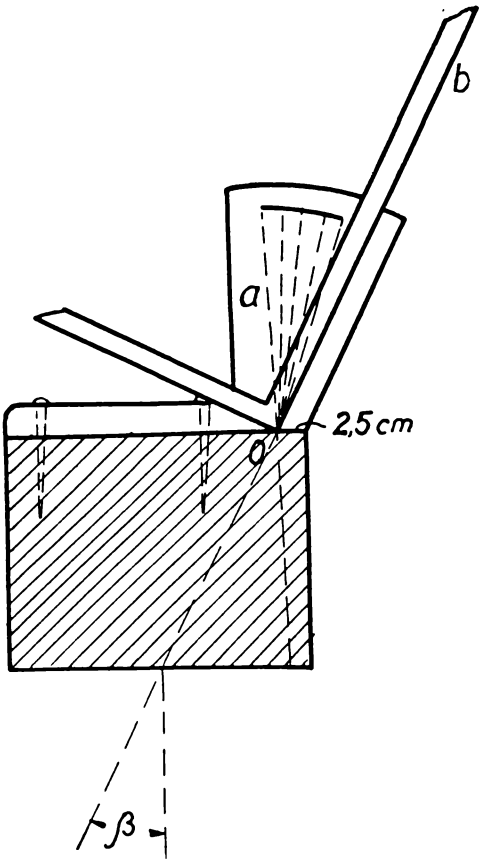
Ze względu na to, że koszt ramion skrzydeł o dużej rozpiętości, wykonanych z jednego kawała drzewa, wypada czasem zbyt duży, ramiona można też wykonać z kilku powiązanych ze sobą części, mianowicie ze wspólnej części środkowej i dwu końcowych (rys. 43); części te wiąże się ze sobą zapomocą strzemion i śrub. W przygotowanym w ten sposób ramieniu przewierca się, a następnie przedłutowuje otwory pod odpowiednim kątem β dla każdego żebra (rys. 44).

W celu nadania wierconym otworom właściwych kierunków, używa się specjalnego szablonu *a* i węgielnicy *b*. Posiłkując się temi przyrządami, nawierca się najpierw tylko 6 do 7

otworów na całej długości ramienia. W otwory te wbija się jednakowej długości listwy, których końce łączy się długą listwą wspólną (rys. 45). Następnie, ustawiając ostrze świdra kolejno w naznaczonych poprzednio na dylu punktach *O*, trzon zaś świdra opierając na listwie wiążącej tymczasowe poprzeczki, wierci się pod żądanym kątem pozostałe otwory. Do niezbędnych wymiarów otwory na żebra powiększa się dłutem.



Rys. 43.

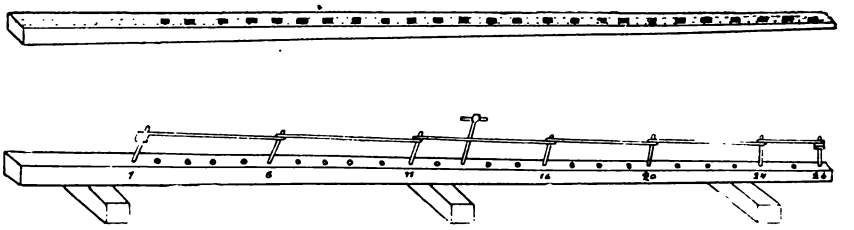


Rys. 44.

Sposób wykonania żeber w opisywanej budowie jest następujący. Każde żebro składa się z dwóch desek *A* i *B* (rys. 46) jednakowej grubości, lecz różnej długości i szerokości. Deski te stanowią szkielet, do którego przybija się gwoździami długości 50 mm poszycie skrzydła. Na końce desek *A* nasadza się wiążącą je półokrągłą listwę *D*. Kształt tej listwy ma na celu

zmniejszenie oporu przy obrocie skrzydła. Grubość desek *A* i *B* wynosi 17,5 mm. Jako materjał na żebra może być użyte wysuszone drzewo sosnowe lub jodłowe.

Po wystruganiu obu desek osadza się je w gniazdach ramienia w ten sposób, że deska *A* wchodzi w ramię z jednej strony, zaś deska *B* z drugiej. Następnie przewierca się w deskach cztery otwory o średnicy 12,5 mm, przeznaczone do zabicia w nie kołków mocujących; odległość między kołkami wynosi 112,5 mm. Same kołki wykonywa się okrągłe o średnicy nieco większej od średnic otworów, używając do ich wyrobu drzewa jesionowego lub dębowego. Po wygotowaniu w oleju i nasmarowaniu sadłem, kołki wbija się w otwory w deskach *A* i *B*, wystające zaś końce ścina się równo z powierzchnią desek, tworzących żebro.



Rys. 45.

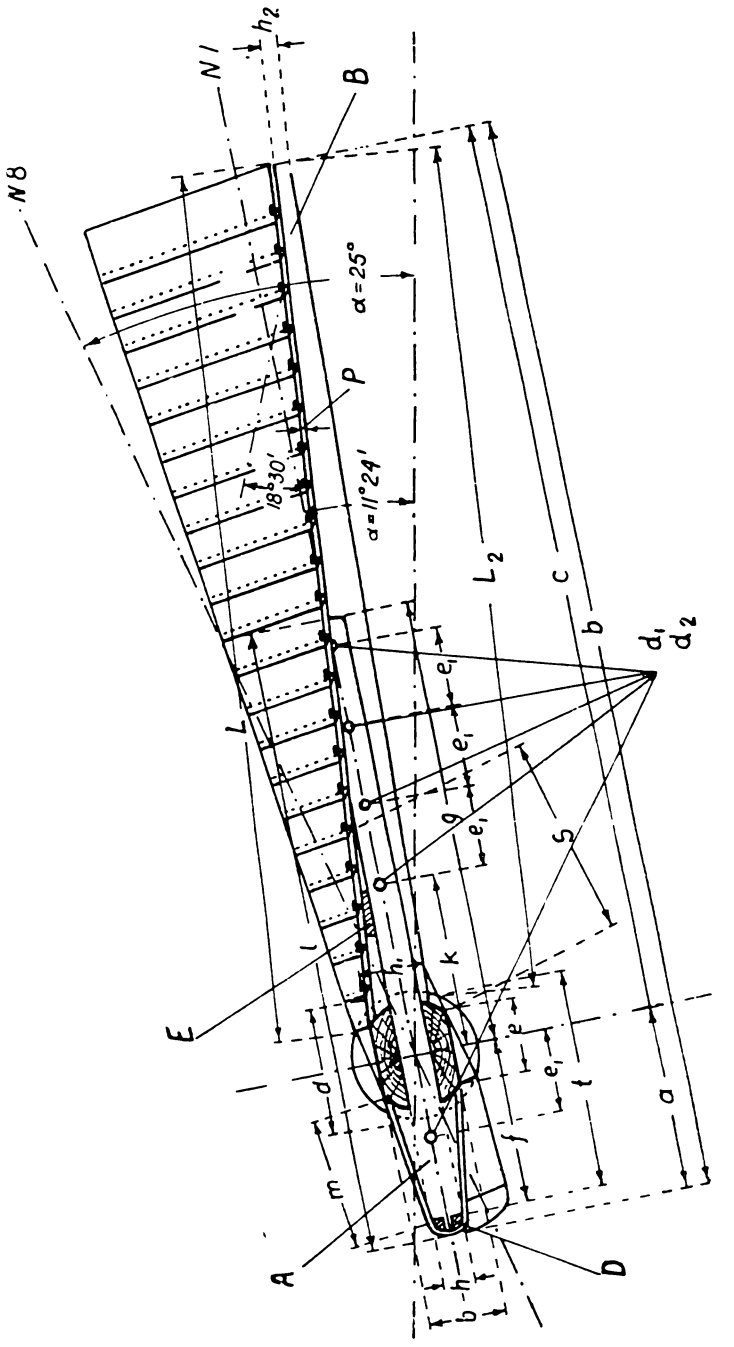
Na osadzone w ramieniu żebra nasadza się przednią listwę *D* i podłużną *E*, przeznaczoną do lepszego powiązania żeber.

Deski na poszycie czynnej powierzchni skrzydła wykonywa się z drzewa sosnowego lub jodłowego. Szerokość ich wynosi około 120 mm, grubość zaś 7 mm. Aby zapewnić poszyciu skrzydła szczelność, krawędzie deszczułek struga się skośnie, dzięki czemu deszczułki wzajemnie się dociskają, tworząc powierzchnię skrzydła nieprzenikliwą dla powietrza. Na Wołyniu jednak poszycie skrzydeł wiatraków wykonywane jest wprost przeciwnie, jako przepuszczające w pewnej mierze powietrze.

Przednią krawędź listwy *D* zaokrągla się według promienia od 25 do 75 mm, listwę zaś obija się żelazną blachą dachową.

W taki sam sposób wykonywa się pozostałe trzy skrzydła, przytem konieczne jest należyte wyważenie skrzydeł przez

dobór wszystkich jednakowych części czterech skrzydeł o tej samej wadze. W tym celu należy przed złożeniem skrzydeł

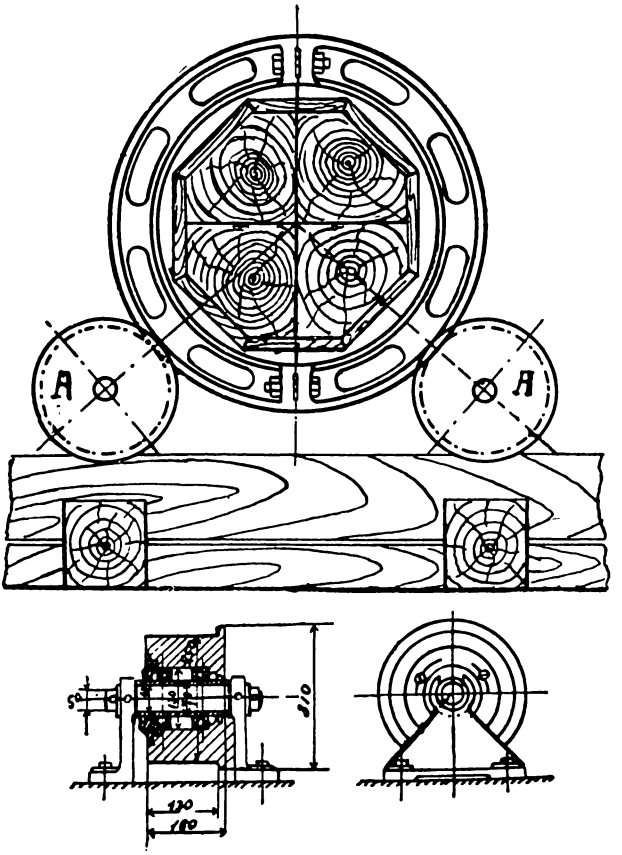


Rys. 46.

ważyć starannie poszczególne części na zwykłej wadze. Ostatecznie wyważa się skrzydła po złożeniu.

W omawianym przykładzie ogólny ciężar jednego skrzydła wynosi 115 kg, z czego na wagę ramienia i żeber przypada 58 kg, na poszycie skrzydła — 53 kg, na żelazo i gwoździe 4 kg.

Wały skrzydłowe silników opisywanych wykonywa się w miarę możności ze stali, żelaza lub wreszcie z drzewa. Jednakże w racjonalnej budowie średnica wału drewnianego może być znacznie zmniejszona w porównaniu z wymiarami zazwyczaj

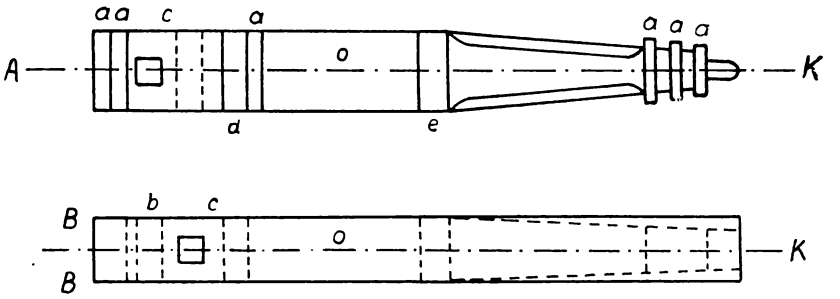


Rys. 47.

spotykanemi. W danym przypadku, przy rozpiętości skrzydeł 10 m, średnica wału drewnianego może wynosić około 56 cm, przytem ten ostatni może się składać z czterech dylów drewnianych, przylegających do siebie i związanych strzemionami. Na przednią część wału korzystnie jest osadzić metalową głowicę z gniazdami, w których zamocowuje się ramiona skrzydeł. Jeżeli jednak ze względów oszczędnościowych wypada wyko-

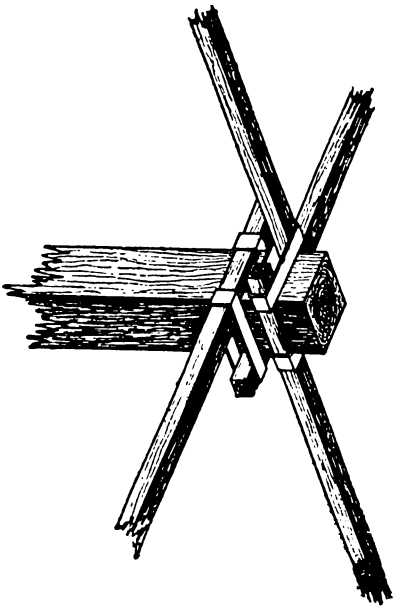
nać wał bez metalowego zakończenia, to do wału drewnianego należy zastosować łożyska rolkowo-kulkowe dla czopa szyjnego (rys. 47) i łożysko kulkowe dla czopa tylnego na końcu wału (rys. 48).

Rys. 48.



Rys. 49.

Budowę wału drewnianego wyjaśnia rysunek 49. Dyle *BB* związuje się w jedną całość zapomocą obręczy *aa;* następnie naznacza się ze wszystkich stron obróbkę na podstawie projektowanego kształtu wału *AK*, poczem poszczególne części składowe poddaje się obróbce osobno. Przedewszystkiem wycina się gniazda *b*, *c* na ramiona. W przypadkach, gdy wał drewniany jest stosunkowo cienki, lub gdy nie chcemy osłabiać go otworami, ramiona osadza się na wale w ten sposób, że nie przechodzą przezeń na wylot, lecz obejmują go z boków (rys. 50).



Rys. 50.

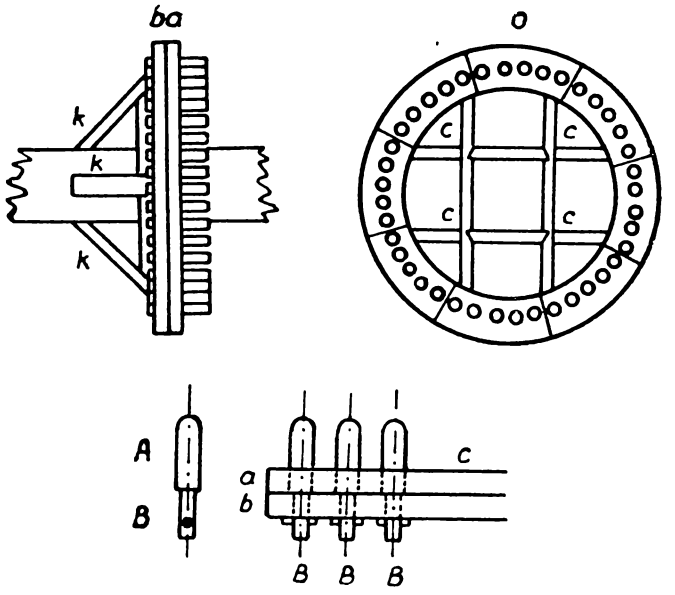
Na przeciwległym końcu wału *K* (rys. 49) zamocowuje się

przez wbicie młotem w przygotowany poprzednio otwór stalowy lub żelazny czop. Obręcze *a*, *a* zakłada się zawsze na gorąco.

Część wału *e*, na którą nasadza się główne koło przekładni oraz przednia część wału posiadają przekrój kwadratowy, resztę zaś w celu zmniejszenia ciężaru obciosuje się na kształt walca lub ostrosłupa sześciościennego.

Czop szyjny wału podpiera się dwoma łożyskami rolkowemi, trzecie zaś łożysko umieszcza zgóry nad czopem; koniec wału *K* z czopem metalowym ustawia się w łożysku kulkowem.

Koło zębate wykonywa się jako stożkowe, bądź też palczaste. To ostatnie wykonywa się z dwu warstw *a* i *b* (rys. 51)



Rys. 51.

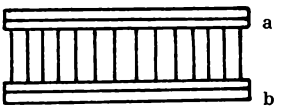
powiązanych ze sobą wycinków sosnowych, tworzących koło *o* o dużej średnicy. Każda warstwa składa się z 8 wycinków grubości 90 mm i szerokości 250 mm, ułożonych w ten sposób, że styki wycinków jednej warstwy wypadają w środkach wycinków drugiej. Srednica *d* takiego koła zależy od liczby obrotów maszyn napędzanych przez wiatrak. W przybliżeniu można przyjąć jako górną granicę $\frac{1}{6} - \frac{1}{7}$ rozpiętości skrzydeł *D* t. j. $d \leqslant 0{,}15\ D$. Stosunek ten daje się w każdym razie zauważyć w młynach istniejących.

Powiązanie wycinków w jedną całość wykonywa się najczęściej zapomocą kołków dębowych. Wystające końce kołków ścina się, kołki zaś umacnia się w otworach również dębowemi klinami.

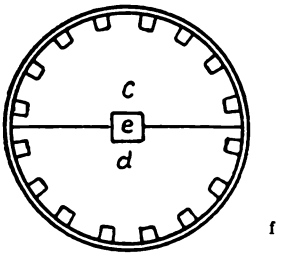
Na ostruganym obwodzie przygotowanego w ten sposób koła oznacza się miejsca i wielkość otworów na palce. Długość palca przyjmuje się równą 1,5 grubości. Co do liczby palców, to zależy ona od liczby obrotów, wymaganej ze względu na pracę urządzeń młyna lub innych maszyn napędzanych przez wiatrak. Palce *A* wytacza się na tokarni, nadając im kształt wskazany na rysunku, poczem w części *B* przewierca się otwory, służące następnie do zabicia klinów mocujących.

Gotowe koło palczaste osadza się na wale i umacnia się podpórkami *k*, *k*.

Drugie koło przekładni palczastej należy przed wykonaniem wykreślić na desce. Liczbę zębów określa się graficznie odpowiednio do promienia koła, mierząc ten ostatni od środka do punktu zazębienia.



Koło zębate osadzone na wrzecionie wiatraka może posiadać bądź uzębienie palczaste, jeśli współpracujące z nim koło zbudowane jest jako palczaste, bądź też uzębienie stożkowe, jeżeli przekładnia zębata składa się z kół stożkowych.

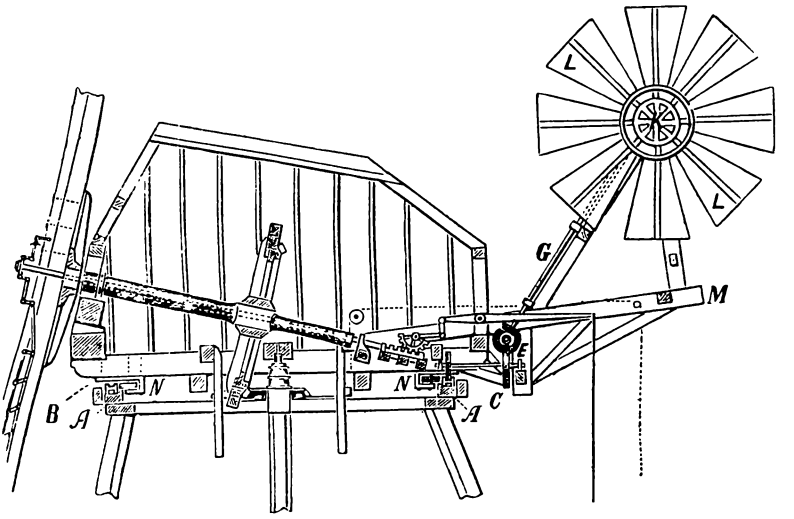


Rys. 52.

Koło zębate palczaste osadzone na wale pionowym składa się z dwóch kręgów *a* i *b* (rys. 52) oddalonych od siebie o tyle, ile wymaga współpraca z kołem zamocowanem na wale skrzydłowym. Kręgi *a* i *b* wykonywa się każdy z dwu tarcz drewnianych, składających się każda z dwu połówek *c* i *d*. Krąg więc tworzą cztery półokrągłe deski, związane klejem i kołkami. Na obrzeżach kręgów najpierw naznacza się, a następnie wycina gniazda na zęby *f*. Po założeniu zębów w otwory na obrzeża kręgów *a* i *b* nasadza się żelazne obręcze, zabezpieczające zęby przed wypadaniem. Oba kręgi wreszcie ściąga się w czterech lub więcej miejscach długiemi śrubami. Gotowe koło nasadza się otworem *e* na czworokątną część wrzeciona wiatraka.

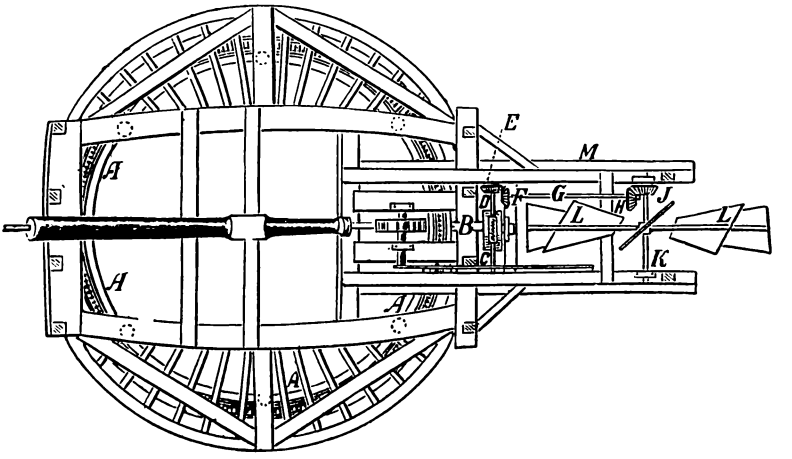
Do poprawnej pracy wiatraka niezbędne jest takie jego ustawienie, aby skrzydła leżały zawsze w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru. Ręczne okręcanie wiatraka, zarówno

typu niemieckiego, jak i holenderskiego, jest nader niewygodne. Do ustawiania wiatraka odpowiednio do kierunku i siły wiatru można wyzyskać energję samego wiatru. Na tej zasadzie bu-



Rys. 53.

duje się obecnie wszystkie udoskonalone wiatraki jako samonastawne, t. j. zaopatrzone w regulację samoczynną. Regulację taką można również zastosować w zwykłych wiatrakach wiejskich typu holenderskiego.



Rys. 54.

Przed wykonaniem jednak urządzenia regulacyjnego w nieposiadającym go wiatraku, należy przedewszystkiem zmniejszyć wszelkie szkodliwe przy obrocie opory. W tym celu najlepiej jest

postawić czapę wiatraka na kilku kołach żłobkowych, toczących się po szynie wygiętej w kształcie koła. Podłoże, na którem spoczywa szyna, powinno być zupełnie poziome, całe zaś urządzenie wykonane starannie.

Jako organ regulacyjny może służyć w małych wiatrakach, posiadających lekkie wieżyce, zwykły ster umieszczony w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny obrotu skrzydeł. Urządzenie takie opiszę nieco dalej przy omawianiu silników nowszych konstrukcyj.

Do regulacji zwykłych wiatraków wiejskich z ciężkiemi wieżycami stosuje się dodatkowe wiatraki sterowe; wygląd takiego wiatraka oraz zasadę jego działania wyjaśniają rysunki 53 i 54.

Wiatrak sterowy umieszcza się w płaszczyźnie wału skrzydłowego; jeżeli stosujemy dwa pomocnicze wiatraki, to umieszczamy je w płaszczyznach równoległych do tej ostatniej. Dopóki skrzydła wiatraka znajdują się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru, płaszczyzna wiatraka sterowego jest równoległa do tego kierunku i wiatrak sterowy, nie podejmując nacisku wiatru, pozostaje w spoczynku; z chwilą jednak zmiany kierunku wiatru poczyna obracać się w jedną lub drugą stronę. Ruch obrotowy przekazuje stożkowa przekładnia zębata na koło zazębiające się zębatką kołową, przymocowaną do nieruchomych belek A, A. Wskutek toczenia się koła zębatego po zębatce, wieżyca wiatraka okręca się aż do chwili, w której kierunek wiatru stanie się równoległy do płaszczyzny wiatraka sterowego, a płaszczyzna obrotu skrzydeł roboczych — ponownie prostopadłą do kierunku wiatru.

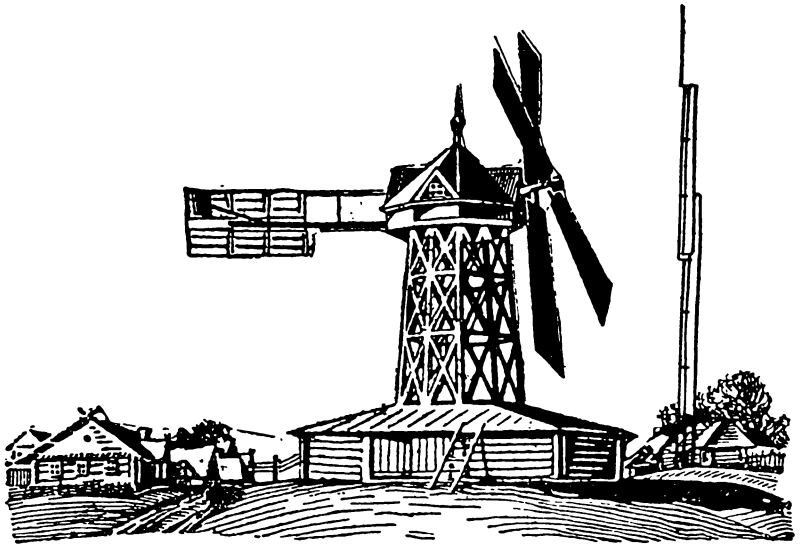
Zastosowanie pomocniczego wiatraka sterowego rozstrzyga więc zupełnie zadowalająco zagadnienie samonastawności wiatraków odpowiednio do zmiennego kierunku wiatru.

Urządzenie takie nie zabezpiecza jednak silnika wietrznego przed uszkodzeniem w czasie burzy, a raczej nawet sprzyja jego zniszczeniu, ponieważ ustawia skrzydła zawsze przeciw wiatrowi.

W silnikach udoskonalonych stosowane są już obecnie różnorodne urządzenia, zapewniające im bezpieczeństwo w przypadkach panowania zbyt silnych wiatrów. W zwykłych wiatrakach wiejskich natomiast regulację naporu wiatru stanowi przeważnie zmiana wielkości powierzchni nośnej skrzydeł przez zmianę liczby płatów, pokrywających szkielet skrzydła, lub odpowiednie rozpostarcie płócien żaglowych.

Zdarza się, że burze nie tylko uszkadzają skrzydła wiatraków, lecz nawet przewracają budynki tych ostatnich; dzieje się to głównie dlatego, że wiatraki poszywa się deskami całkowicie, niemal do ziemi, choć np. w wiatraku typu niemieckiego dolną część jego stanowi tylko słup osiowy i jego podstawa. W ostatnim przypadku poszycie daje się w celu zabezpieczenia słupa głównego od szybkiego gnicia wskutek wpływu wilgoci. Ze względu więc na ochronę przed zburzeniem siłą wiatru, należałoby budynki wiatraków wykonywać w większej części w postaci przewiewnych wież, stawiających wiatrowi możliwie mały opór (rys. 55).

Budowa takich wież może być różnoraka, poczynając od



Rys. 55.

najprostszej w postaci czterech słupów aż do bardziej skomplikowanych.

Pozatem wieża przewiewna stwarza bardziej normalne warunki opływu wiatru około dolnej części wirnika skrzydłowego, aniżeli w wiatrakach z budynkami całkowicie poszytemi. Wyjaśnia to rys. 56 (a, b, c).

Co do wysokości wzniesienia wału skrzydłowego ponad powierzchnią ziemi i wyboru miejsca na wiatrak, to należy koniecznie brać pod uwagę następujące okoliczności.

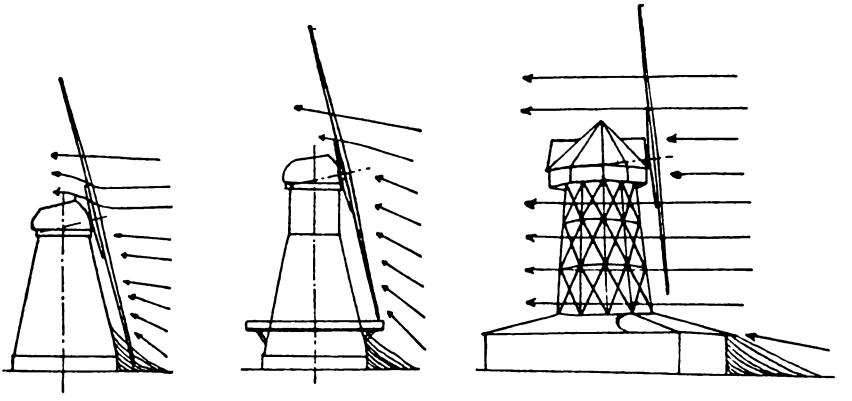
Doświadczenia dowiodły, że wieża, na której ustawiony jest silnik wietrzny, powinna być tak wysoka, by dolna część skrzydeł znajdowała się o 2 do 3 m wyżej ponad budynkami

i drzewami, otaczającemi wiatrak na obszarze o promieniu 300 m od wiatraka.

Wpobliżu lasów, dużych zagajników, w okolicy pagórkowatej lub w sąsiedztwie budynków dolny koniec skrzydła wiatraka nie powinien znajdować się poniżej 15 m od ziemi, w otwartem zaś polu wysokość ta może wynosić 10 m. Zazwyczaj jednak skrzydła wiatraków wiejskich sięgają niestety niemal powierzchni ziemi.

Do silników stawianych na dużej wysokości trzeba już stosować wieże żelazne, wykonane w postaci kratownic.

Za podstawę wieży drewnianej mogą służyć ułożone na krzyż obrzynki pni drzewnych, zakopywane w ziemi na głębokości równej conajmniej 0,1 wysokości wieży. Nogi wieży przymocowuje się do wystających nad ziemię końców pni zapomocą



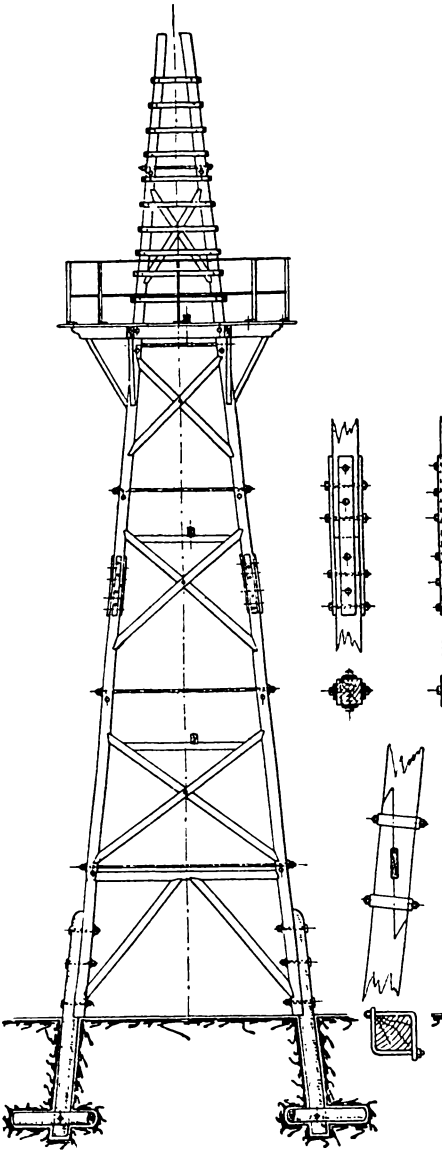
Rys. 56.

żelaznych skobli i strzemion (rys. 57). Do tego samego celu można również zamiast pni drzewnych użyć szyn lub belek żelaznych, których dolne końce zabetonowuje się w fundamencie, górne zaś pozostawia się ponad ziemią na wysokości $^1/_3$ do $^1/_2$ m. Do wystających części belek przymocowuje się zapomocą śrub główne dźwigary drewniane wieży (rys. 58).

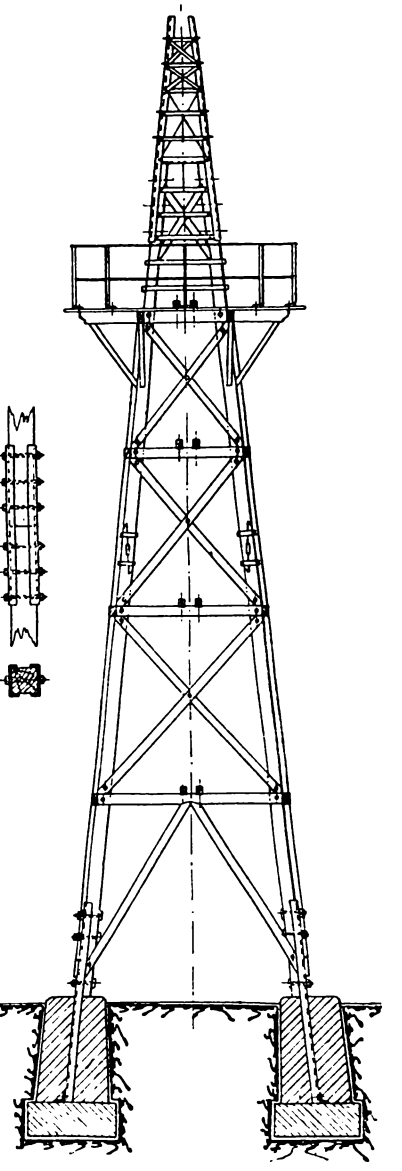
W przypadkach gruntów słabych, podstawę wieży wykonywa się w kształcie ramy, spoczywającej na palach wbitych w ziemię, przytem liczba tych ostatnich i głębokość wbicia zależą od rodzaju gruntu i ciężaru wieży.

Do liczby ulepszeń wiatraków wiejskich należy zaliczyć jeszcze umieszczenie wpobliżu nich piorunochronów. Najodpowiedniejszem wykonaniem zabezpieczenia wiatraka od uderzeń pioruna jest umieszczenie piorunochronu na szczycie

drewnianego słupa, wkopanego opodal wiatraka. Przyjęto przytem uważać, iż należycie ustawiony piorunochron zabezpiecza przestrzeń w obrębie stożka o promieniu podstawy



Rys. 57.



Rzs. 58.

równym wysokości słupa. Opierając się na tej zasadzie, można określić niezbędne wzniesienie piorunochrona ponad powierzchnię ziemi. Należy mianowicie nakreślić szkicowo wiatrak

wraz ze skrzydłami, wrysować w określonej odległości, np. 10 m, pionową oś słupa piorunochrona, a następnie do przecięcia z tą ostatnią poprowadzić przez koniec skrzydła w górnem jego położeniu linję prostą pod kątem 45^0 względem linji horyzontu. Odcinek wykreślonej osi pionowej, zawarty między powierzchnią ziemi i punktem przecięcia tych dwóch prostych, będzie w odpowiedniej podziałce niezbędną wysokością wzniesienie piorunochrona.

ROZDZIAŁ V.

Silniki wietrzne nowoczesne.

Wiatraki czteroskrzydłowe „Mammuth".—Turbiny wietrzne.—Wiatraki szybkobieżne.—Silnik żaglowy Durand'a.—Silniki wietrzne uruchamiane siłą oporu czołowego.— Zjawisko Magnusa.— Silnik Flettner'a:— Silnik Savonius'a. — Wieże. — Wyzyskanie wiatrów górnych.

1. **Wiatraki czteroskrzydłowe „Mammuth".** Silniki wietrzne systemu „Mammuth", wyrabiane przez firmę Lykkegaard Windmill Co w Danji, stanowią w istocie wiatraki typu holenderskiego. Rysunki 59 i 60, przedstawiają silnik ten przy dwu ustawieniach skrzydeł, wykonanych w postaci oddzielnych płatów, ruchomych dokoła swych osi. Regulacja odbywa się w ten sposób, iż skrzydła, okręcając się pod wpływem wzrostu parcia wiatru dokoła osi, zmniejszają powierzchnię skierowaną przeciwko

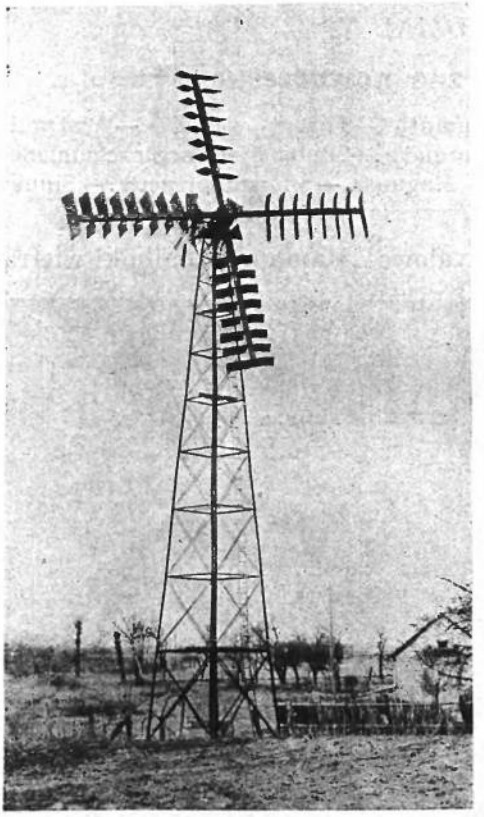
Rys. 59.

wiatrowi. Prócz regulacji mocy, uzyskuje się w ten sposób również pewne zabezpieczenie od uszkodzenia skrzydeł przez zbyt silny powiew wiatru.

Ustawianie skrzydeł odpowiednio do kierunku wiatru osiąga się zapomocą dwu wiatraków sterowych.

Budowa głównej części wiatraka uwidoczniona jest na rys. 61.

Drewniane ramiona skrzydeł *A* osadzone są w żelaznej nasadzie *B*, założonej na wał *C*, który obraca się w łożyskach kulkowych *D* i *E*. Przekładnia zębata *NO* przenosi ruch obrotowy wału skrzydłowego na wał *P*. Wiatraki sterowe napędzają za pośrednictwem kół zębatych *R* i *T* oraz wałka *U* przekładnię ślimakową *V*, związaną z obrotnicą wiatraka. Wewnątrz wału głównego znajduje się drążek *H*, połączony z jednej strony zapomocą układu dźwigni z płatami skrzydeł, z drugiej zaś z dźwignią *KK*, zaopatrzoną w przeciwwagę *L*. Zadanie przeciwwagi polega na przeciwdziałaniu parciu wiatru na ruchome płaty i utrzymywanie tych ostatnich w położeniu odpowiadającem największej powierzchni skrzydeł. Dzięki odpowiedniemu doborowi przeciwwagi, płaty rozchylają się tylko przy określonej sile wiatru.



Rys. 60.

Silniki „Mammuth" budowane są zazwyczaj ze skrzydłami o rozpiętości 7, 9, 10, 12, 14, 16, 18 i 20 m.

Co się tyczy mocy tych silników, to firma Lykkegaard podaje odpowiednie liczby dość ostrożnie (tabl. 18).

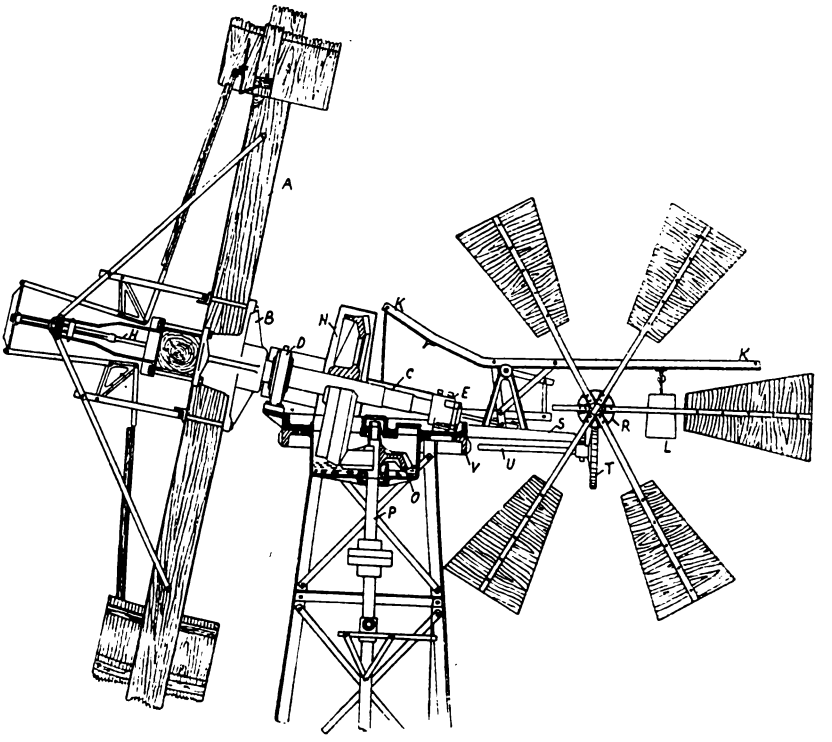
2. **Turbiny wietrzne.** Charakterystyczną część turbiny

TABLICA 18.

Rozpiętość skrzydeł m	Szybkość wiatru m/sek							
	5	6	7	8	9	10	11	⩾11,4
7	0,9	1,5	2,4	3,5	4,6	5,3	6,3	6,9
9	1,65	2,9	4,6	6,85	8,6	10,0	11,0	12,5
10	1,8	3,1	5,0	7,1	9,2	11,1	13,0	14,4
12	2,6	4,5	7,6	10,2	13,2	16,0	18,9	20,0
14	3,5	6,2	9,7	14,4	18,0	22,0	25,8	28,5
15	4,0	7,1	11,1	16,3	20,7	25,2	29,6	33,2
16	4,6	8,0	12,6	18,2	23,4	28,5	33,5	37,0
18	5,8	10,0	16,0	23,0	29,7	35,0	42,4	47,0

wietrznej stanowi wirnik wietrzny, składający się z dużej liczby łopatek.

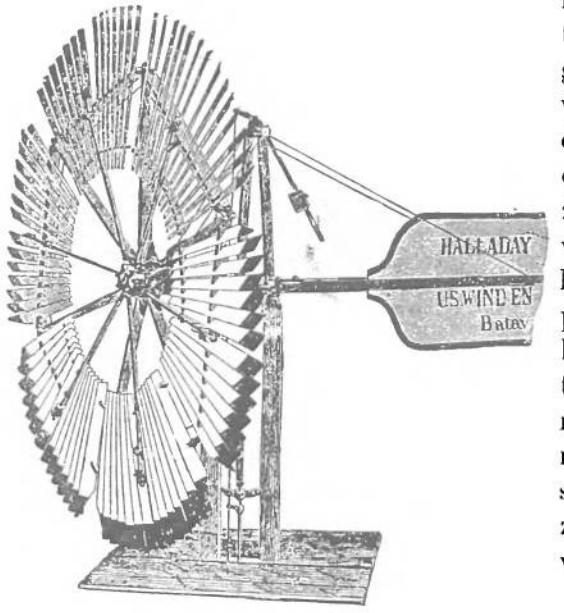
Typowemi turbinami wietrznemi są silniki: 1) systemu



Rys. 61.

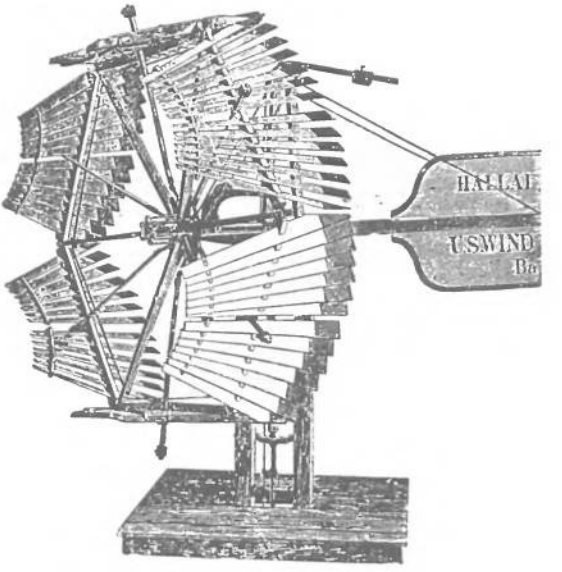
Halladay'a i 2) systemu Corcoran'a lub silniki Eklips. Nowsze turbiny są to przeważnie udoskonalone silniki drugiego typu.

Budowę silników systemu Halladay-a wyjaśniają rysunki 62 i 63. Silniki te posiadają regulację zależną zarówno od kierunku, jak i siły wiatru. Pierwszą osiągnięto przez zastosowanie dużego steru drewnianego, umieszczonego w płaszczyźnie wału skrzydłowego prostopadle do koła łopatkowego i przymocowanego do kadłuba czapy wiatraka. Dzięki obecności steru, wirnik wietrzny ustawia się odpowiednio do zmiennego kierunku wiatru.



Rys. 62.

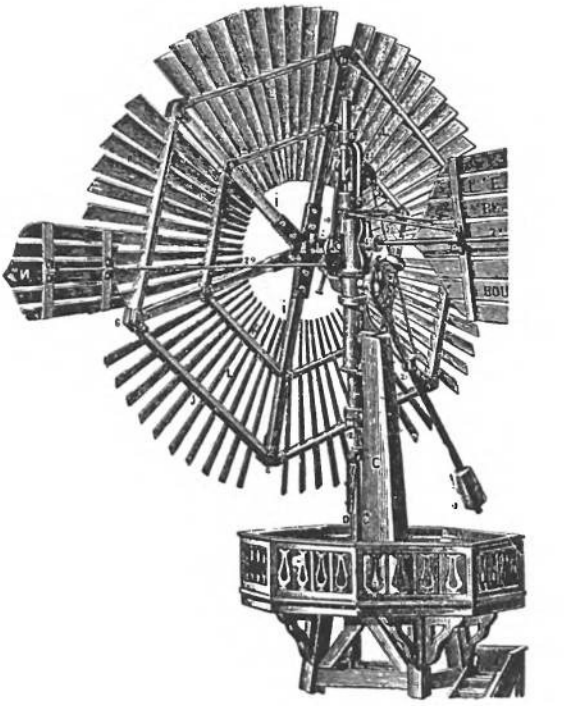
Do regulacji silnika zależnie od siły wiatru służy urządzenie następujące. Wirnik wiatraka podzielony jest na sześć niezależnych wycinków; każdy wycinek, obejmujący pewną liczbę śmig, może obracać się w całości dokoła osi, wiążącej dwa ramiona wirnika, przytem położenie jego w stosunku do kierunku wiatru z prostopadłego może stać się równoległem. Poszczególne wycinki powiązane są ze wspólną dźwignią, zaopatrzoną w przeciwwagę. Przy wietrze o sile normalnej, wskutek oddziaływania przeciwwagi na wewnętrzne części wycin-



Rys. 63.

ków wieńca śmig wirnik znajduje się w położeniu przedstawionem na rys. 62; przy wzroście siły wiatru, napór jego na większe powierzchnie zewnętrznych części wycinków również wzrasta i, pokonując opór przeciwwagi, wywołuje obrót sekcyj śmig dokoła osi; krańcowe położenie wirnika wskazuje rys. 63. Wskutek zmniejszania się czołowej powierzchni wirnika zmniejsza się również parcie wiatru na śmigi i silnik zwalnia bieg lub nawet staje.

Chociaż silniki systemu Halladay'a czynią zadość wymaganiom co do samoczynnej regulacji, to jednak budowa wirnika i urządzeń regulacyjnych jest dość skomplikowana.



Rys. 64.

Silniki wietrzne systemu Corcoran'a (rys. 64) posiadają wirnik, składający się również z dużej liczby śmig, lecz związanych nieruchomo ze szkieletem.

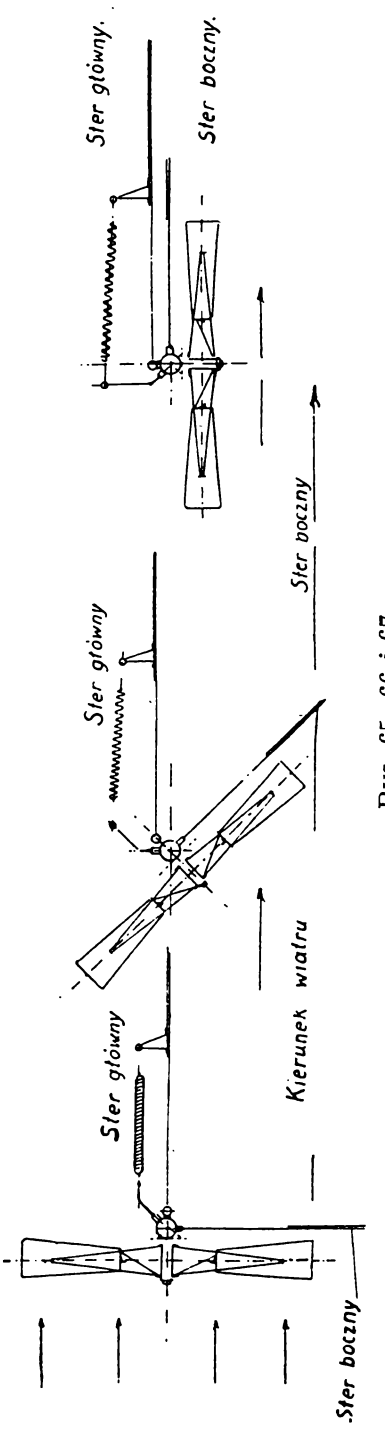
Regulacja tego silnika odbywa się również samoczynnie, oparta jest jednak na innej zupełnie zasadzie, niż w silnikach Halladay'a.

Samoustawność wiatraka zależnie od kierunku wiatru osiąga się i tutaj również zapomocą steru, związanego z wirnikiem w ten sposób, że może zajmować różne położenia między ustawieniem prostopadłem do tarczy wirnika a równoległem do niej.

Oprócz steru głównego, wirniki systemu Corcoran'a posiadają jeszcze ster mniejszy boczny *N*, umieszczony bądź w płaszczyźnie wirnika, bądź też równolegle do niej. Ster ten, związany nieruchomo z wirnikiem, stanowi istotną część mechanizmu regulacyjnego działającego zależnie od zmienności siły wiatru.

Dopóki szybkość wiatru nie przekracza pewnej określonej

dla danej miejscowości granicy, ster boczny wraz z wirnikiem pozostaje pod działaniem sprężyn lub dźwigni w położeniu prostopadłem do płaszczyzny steru głównego, przytem wirnik skierowany jest prostopadle do kierunku wiatru, zaś ster główny ustawiony zgodnie z tym ostatnim (rys. 65).



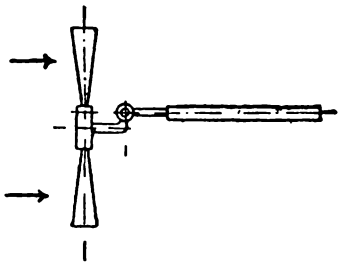
Rys. 65, 66 i 67.

Z chwilą przekroczenia wspomnianej granicy, parcie wiatru na ster boczny przezwycięża siłę napięcia sprężyn i obraca wirnik, ustawiając go w położeniu wskazanem na rys. 66, przytem ster główny w dalszym ciągu skierowany jest zgodnie z kierunkiem wiatru, jedynie zmniejsza się kąt pomiędzy płaszczyzną wirnika a płaszczyzną steru głównego. Przy bardzo silnym wietrze, oba stery i wirnik zajmą położenie równoległe do kierunku wiatru, a powierzchnie skierowane przeciwko wiatrowi osiągną swoje minimum (rys. 67).

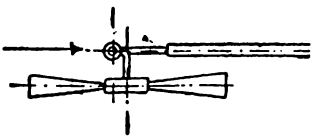
Ten sam skutek można osiągnąć również bez użycia steru bocznego, należy tylko płaszczyznę steru głównego umieścić nie w osi wirnika. Pod działaniem odpowiedniej siły wiatru wirnik, pokonywając przeciwdziałanie sprężyn lub przeciwwagi, będzie dążył do zmiany ustawienia w stosunku do kierunku wiatru (rys. 68 i 69).

Na samoczynną regulację silnika wietrznego odpowiednio do siły wiatru wpływa również wielkość obciążenia zewnętrz-

nego, t. j. użytecznego momentu oporu poruszanych maszyn. Im większe jest obciążenie silnika, tem trudniej jest wykręcić wirnik z położenia normalnego, i odwrotnie, przy spadku ob-

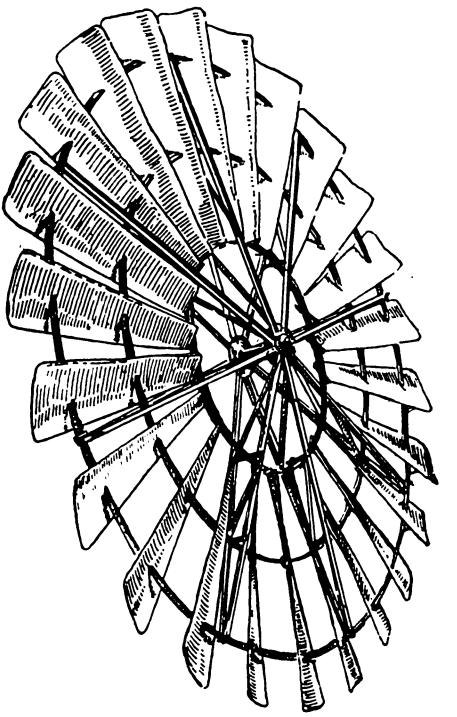


Rys. 68.



Rys. 69.

ciążenia i możliwości wzrostu prędkości obrotu wirnika do wielkości niepożądanej, wirnik ustawi się w nowem położeniu, już przy wietrze o mniejszej sile. Dzięki skojarzeniu działania dwu sterów, sprężyn i sprzęgniętych z silnikiem maszyn roboczych, osiąga się bardzo dobrą regulację zarówno w stosunku do siły, jak i kierunku wiatru, we wszystkich przypadkach, z wyjątkiem przypadków stosowania silnika wietrznego do wytwarzania energji elektrycznej, o czem zresztą będzie mowa niżej.



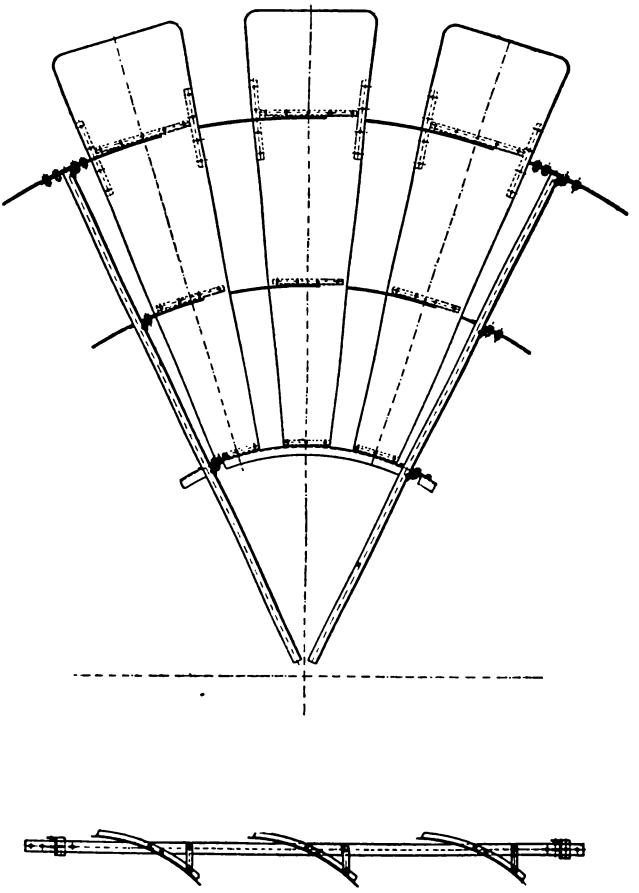
Rys. 70.

Budowa najbardziej nowoczesnych wieloskrzydłowych silników wietrznych czyli turbin wietrznych oparta jest przeważnie na pomyśle Corcoran'a, z tą tylko różnicą, że wszystkie części silnika wykonywa się metalowe; konstrukcja opracowana jest zazwyczaj bardzo starannie i szczegółowo, z zastosowaniem najnowszych sposobów do zmniejszenia oporów tarcia.

Wirnik nowoczesnej turbiny wietrznej wykonywa się

obecnie w kształcie wieńca dużej liczby (powyżej 50) śmig żelaznych, powiązanych w jedną sztywną całość (rys. 70).

Kąt odchylenia powierzchni śmig od płaszczyzny obrotu zmniejsza się począwszy od środkowego pierścienia wiążącego aż do obwodu zewnętrznego (w przybliżeniu od 48^0 do 15^0). Średnica zewnętrzna wirników waha się od 2,5 m do 16 m, najczęściej wynosi od 4 do 10 m.

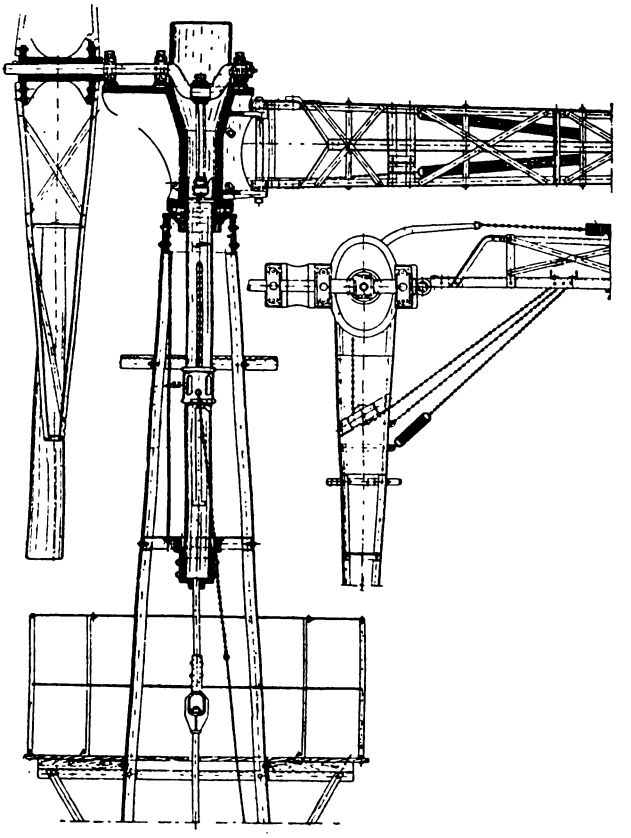


Rys. 71.

W celu łatwiejszego składania wirnika wykonywa się go zazwyczaj z kilku wycinków (6 do 8), których budowę uwidacznia rys. 71. Wirnik zamocowuje się na wale stalowym, wirującym w łożyskach kulkowych. W innem rozwiązaniu wirnik obraca się dokoła nieruchomej osi stalowej.

Przenoszenie ruchu do maszyn roboczych odbywać się może w sposób dwojaki, zależnie od przeznaczenia silnika. Przy

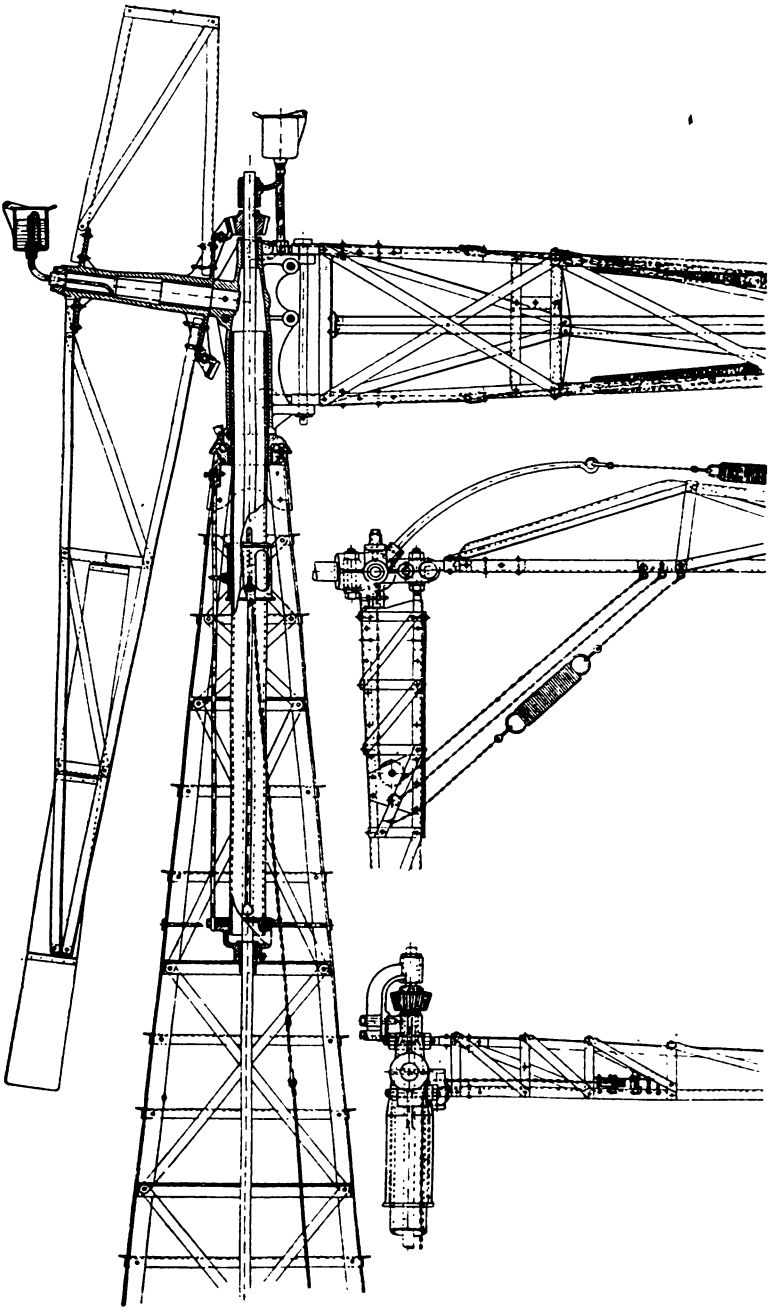
pompowaniu wody najczęściej zachodzi konieczność uzyskania posuwistego ruchu drąga tłokowego, przy napędzie zaś innych maszyn — obrotowego ruchu wału pionowego. Głowica silnika w obu przypadkach posiada odpowiednią budowę. Na rys. 72 przedstawione są główne części silnika wietrznego „Athlet", przeznaczonego do wypompowywania wody. Silnik ten charakteryzuje poziome ułożenie osi wału skrzydłowego, dzięki czemu wirnik obraca się w płaszczyźnie pionowej. Zakończenie wału



Rys. 72.

wykonane jest w kształcie korby, służącej do bezpośredniego napędu korbowodu pompy. Regulacja silnika zapomocą dwu sterów oparta jest na pomyśle Corcoran'a. Na rysunku widoczny jest również łańcuch, służący do dowolnego ustawiania wirnika w różnych płaszczyznach względem kierunku wiatru. Przez pociąganie łańcucha zapomocą małej wciągarki można zbliżyć ster boczny wraz z wirnikiem do steru głównego, który pod

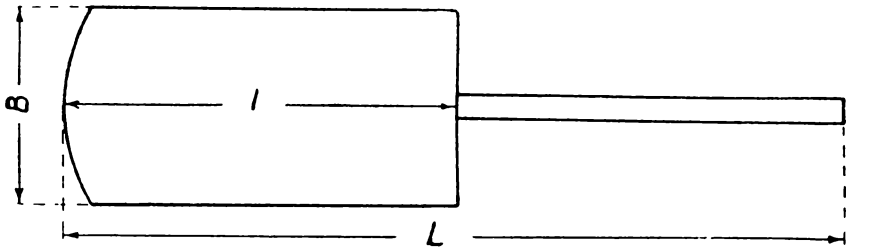
działaniem wiatru pozostaje stale w płaszczyźnie zgodnej z jego kierunkiem. W ten sposób możliwa jest regulacja szybkości obrotu silnika lub też zupełne jego zatrzymanie.



W celu zmniejszenia szybkości ruchu korby stosuje się czasem przekładnię czołowych kół zębatych o stosunku $^1/_2$ do $^1/_3$.

Na rys. 73 przedstawiony jest typowy silnik nowoczesny z przekładnią stożkową, służącą do przenoszenia ruchu obrotowego na wał pionowy, czyli t. zw. wrzeciono wiatraka. Cechę charakterystyczną stanowi pochylenie osi wału skrzydłowego względem poziomu pod kątem 6^0 do 7^0; dzięki pochyleniu płaszczyzny obrotu śmig, wirnik może być umieszczony blisko pionowej osi głowicy silnika. Stosunek przekładni w zależności od zastosowania silnika wynosi: przy napędzie maszyn rolniczych 1 : 1, prądnic — 1 : 2, pomp — 1 : 5 lub 1 : 6.

Głowica silnika obraca się w płaszczyźnie poziomej w łożyskach kulkowych. Smarowanie górnej części silnika odbywa się samoczynnie. Dzięki temu opory tarcia są bardzo małe.



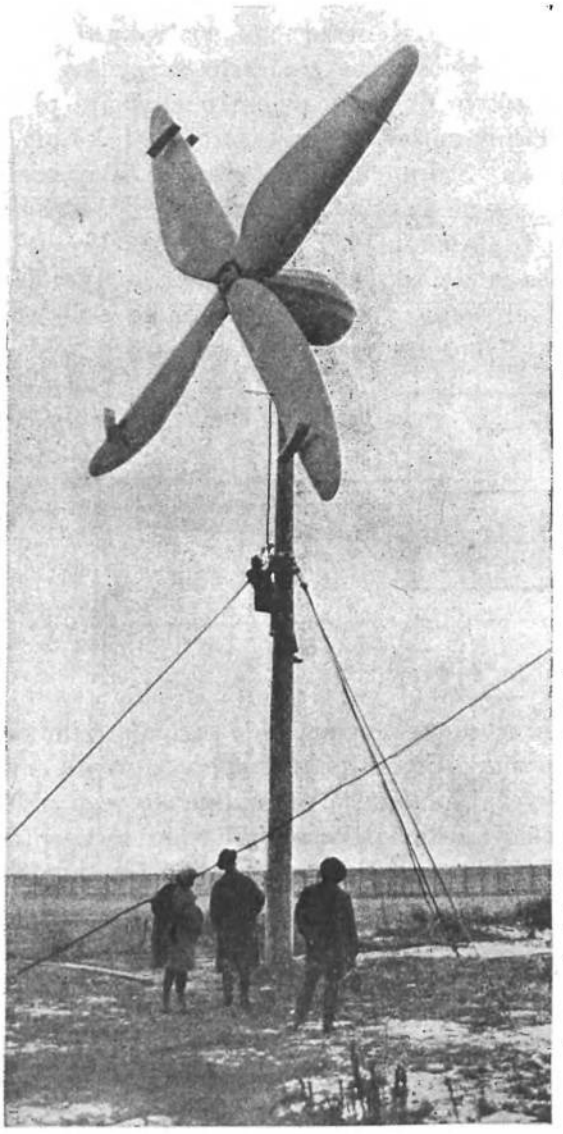
Rys. 74.

Podobnie jak w poprzednim przypadku, do regulacji silnika stosuje się tutaj również urządzenie o dwu sterach. Wymiary sterów określa się zazwyczaj zapomocą rachunku, którego jednak szczegółowo omawiać nie będę. W przybliżeniu całkowita długość steru (rys. 74) L równa jest średnicy wirnika D; długość płatu sterowego $l = \frac{D}{2}$, szerokość zaś $B = \frac{D}{4}$.

3. **Wiatraki szybkobieżne.** Zaletą omówionych wyżej silników wieloskrzydłowych jest duży moment rozruchowy, t. j. zdolność do ruszania przy bardzo słabych wiatrach, bo o szybkości już od 1,9 m/sek, podczas gdy do uruchomienia zwykłego wiatraka czteroskrzydłowego nawet wiatr o szybkości 4 m/sek okazuje się zbyt słaby.

Jednakże co do stopnia wyzyskania energji wiatru w silnikach wieloskrzydłowych istnieją różne poglądy. W rozważaniach teoretycznych wspomniałem, że według pewnej grupy doświadczeń wartość spółczynnika ξ dla turbin wietrznych wy-

nosi 0,30 ÷ 0,35, gdy tymczasem K. Bilau podaje $\xi \cong 0{,}10$. Konstruktor ten uważa stosowanie wieloskrzydłowych silników wietrznych raczej za cofanie się wstecz, aniżeli za postęp. Zdaniem jego najbardziej racjonalną budowę posiadają silniki z małą liczbą skrzydeł, wykonanych w kształcie śmigieł o dobrze dobranych profilach aerodynamicznych. Typowy silnik śmigłowy przedstawiony jest na rys. 75. Jest to silnik zbudowany przez K. Bilau'a koło Berlina w 1925 r.

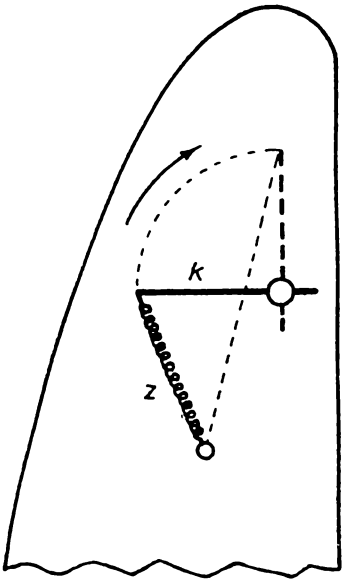


Rys. 75.

Cztery śmigi o rozpiętości 9 m posiadają swoisty kształt o t. zw. profilach omywanych. Liczbie obrotów 50 na minutę odpowiada stosunek prędkości obwodowej końców skrzydeł do szybkości wiatru równy 4,7. Silnik Bilau'a jest więc silnikiem szybkobieżnym. Mechanizm przekładni zębatej, jak również prądnica, umieszczone są w osłonie metalowej wykonanej w kształcie gruszy, zwróconej grubszym końcem przeciw wiatrowi. Omawiany kształt osłony znakomicie zmniejsza opór czołowy urządzenia.

Bardzo ciekawa jest samoczynna regulacja liczby obrotów silnika. Na odwrotnej stronie każdej śmigi wpobliżu jej zakoń-

czenia umieszczona jest płaska klapa *k* (rys. 76), osadzona niesymetrycznie na osi obrotu i utrzymywana zapomocą sprężyny *z* w położeniu zgodnem z kierunkiem prędkości obwodowej. Przy obrocie skrzydła z określoną szybkością klapa nie stawia oporu, jednak przy przekroczeniu pewnej granicy siły wiatru i związanym z tem wzrostem liczby obrotów silnika siła odśrodkowa przezwycięża napięcie sprężyny, ustawiając klapę pod pewnym kątem do kierunku prędkości obwodowej. Powstaje dodatkowy opór wentylacyjny, dzięki czemu silnik zwalnia bieg. Klapy o dostatecznie dużych wymiarach umożliwiają wykorzystywanie wiatrów silniejszych bez obawy rozwinięcia nadmiernych prędkości.



Rys. 76.

Niewielkie silniki tego typu, o mocy do 10 KM, mogą być umieszczane wprost na masztach, umocowanych zapomocą cięgien. Większe natomiast należy ustawiać na specjalnych wieżach, podobnych do tych, które omawialiśmy wyżej.

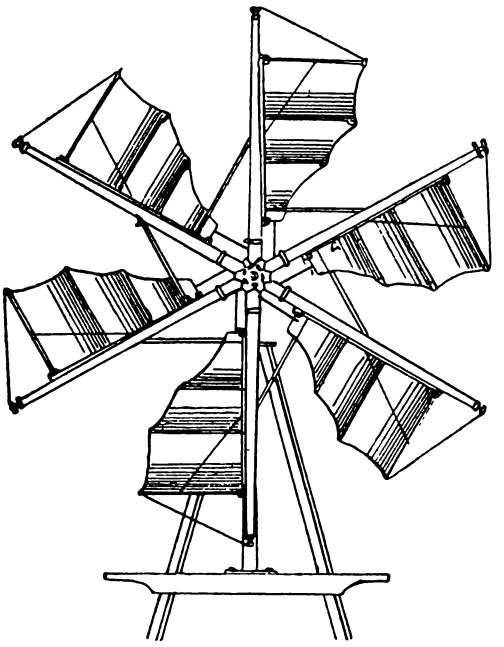
Spółczynnik wykorzystania energji wiatru ξ w silnikach śmigłowych Bilau przyjmuje równy około 0,40, t. j. największy ze wszystkich określonych dla różnych typów silników wietrznych.

Regulacja silników Bilau'a zależnie od kierunku wiatru odbywa się bez pomocy sterów, ponieważ śmigło umieszczone jest z tyłu głowicy silnika, dzięki czemu samo ustawia się zawsze przeciwko wiatrowi, zgodnie z jego kierunkiem.

Zasadę małej liczby śmig ($2 \div 4$) o profilach aerodynamicznych zastosował również niemiecki inżynier Gromann w swoich silnikach wietrznych zbudowanych dla kilku elektrowni. Rozruch tych silników jest do tego stopnia łatwy, że śmigła poczynają pracować już przy szybkości wiatru 1,9 m/sek.

4. **Silnik żaglowy Durand'a**. Oryginalny ten silnik o skrzydłach w kształcie żagli można zaliczyć do grupy silników wietrznych wieloskrzydłowych (rys. 77). We wspólnej piaście wału poziomego osadzonych jest 6 ramion rurowych. Do każdego ramienia przymocowane są 4 żebra, na których rozpięte jest

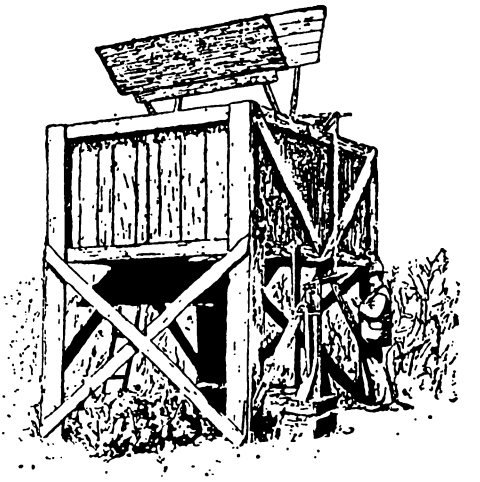
w kształcie żagla płótno brezentowe. Zapomocą prostych a pomysłowych przyrządów kierunek oraz napięcie żagli reguluje się automatycznie w zależności od siły wiatru*).



Rys. 77.

5. **Silniki wietrzne uruchamiane siłą oporu czołowego.** Z rozważań teoretycznych wynika (rozdz. II), że stopień wyzyskania energji wiatru w silnikach pracujących pod działaniem siły oporu czołowego jest mniejszy niż w silnikach dotychczas opisanych. Dlatego też, jak wspomnieliśmy, silniki te nie zdołały rozpowszechnić się narówni z innemi typami. Ze względu jednak na prostotę budowy warto rozpatrzeć niektóre typy tej grupy silników wietrznych.

Silniki z osią poziomą (bębnowe). Na dużych obszarach stepowych Ameryki przeważają wiatry, wiejące w pewnym określonym kierunku. Oddawna też farmerzy budują tam najprostsze silniki wietrzne, stosując je w gospodarstwie przeważnie do pompowania wody. Silnik taki (rys. 78), wykonany całkowicie z drzewa w kształcie bębna, zaopatrzony jest w 4 do 8 łopatek. Te ostatnie są to deski o długości 0,70 do 2,25 m i szerokości 0,50 do 0,80 m, przy-



Rys. 78.

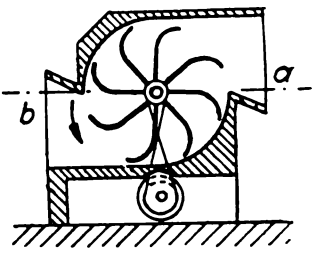
*) F. Neumann. Die Windkraftmaschinen, r. 1907, str. 115—122.

mocowane do końców ramion osadzonych w głównej osi silnika. Długość ramion wynosi 1,25 do 1,75 m. Dolna część bębna łopatkowego ukryta jest od wiatru w skrzyni o głębokości 1,40 — 2,00 m, długości 2,5 — 3,50 m i szerokości 2,00 — 2,50 m. Szerokość łopatki takiego silnika nie powinna być większą od połowy długości ramienia, aby pozostała przestrzeń umożliwiała odpływ powietrza z silnika po wykonaniu pracy. W celu jeszcze łatwiejszego odprowadzenia powietrza porywanego przez łopatki ku dołowi, dno skrzyni wykonywa się w kształcie wieka dwuskrzydłowego.

Do zatrzymania takiego silnika służą zasłony, odcinające dostęp powietrza do łopatek lub też opuszczane tylne i przednie ściany skrzyni. Zapomocą zasłon lub ruchomych ścian można również przez zmianę przysłonięcia łopatek regulować moc silnika.

Praca tego rodzaju silnika możliwa jest oczywiście jedynie pod działaniem czołowego naporu wiatru z jednej lub drugiej strony łopatek, wiatry zaś o innych kierunkach nie dadzą się w tym silniku wyzyskać. Nadto ruch obrotowy bębna łopatkowego, zależnie od możliwych tylko dwóch przeciwnych kierunków wiatru, może się odbywać w jedną lub drugą stronę, co nie zawsze jest dopuszczalne.

W celu usunięcia tej wady Motz umieścił bęben nie w skrzyni, a w osłonie o budowie wskazanej na rys. 79. W osłonie tej zrobione są dwa podłużne otwory *a* i *b*, przytem jeden z nich (*a*) umieszczony jest powyżej osi obrotu, drugi zaś poniżej. Urządzenie takie zapewnia silnikowi bieg jednokierunkowy niezależnie od kierunku wiatru. Dzięki wygięciu łopatek, silnik ten mógłby pracować w jednym kierunku również i bez osłony, jednakże z mniejszym spółczynnikiem wyzyskania energji wiatru ξ.

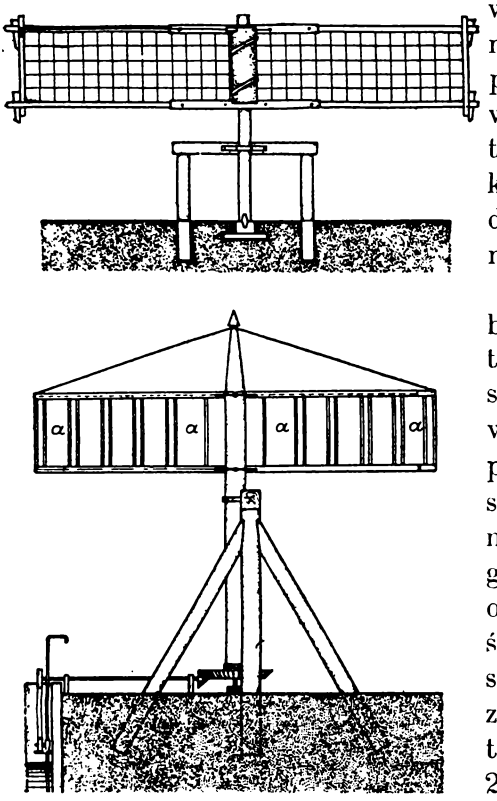


Rys. 79.

Naogół silniki opisane oraz podobne do nich posiadają małą moc. Ciężkie łopatki obciążają nadmiernie oś, wywołując przy obrocie duże tarcie w czopach. Jeżeli więc zastosowanie takich silników jest możliwe, to tylko w przypadkach, gdy nie wymagana jest praca równomierna, ani duża moc, przytem w miejscowościach, w których kierunek wiatru jest mniej więcej stały, np. w wąwozach górskich lub na brzegu morza.

Silniki z osią pionową (karuzelowe). Najprostszym silnikiem z pionową osią obrotu jest silnik Nuchowa (rys. 80).

Szkielet skrzydeł składa się z dwu prostokątnych ram, ułożonych na krzyż i wykonanych każda z czterech powiązanych ze sobą żerdzi. W prostokątach ram rozpięta jest siatka sznurowa lub druciana, do górnych zaś żerdzi przymocowane żelazne pręty, na których zawiesza się żaglowe zasłony w ten sposób, aby wiatr przyciskał je do siatki z jednej strony osi i odrzucał od niej, po obrocie skrzydła o 180°. Aby zasłona mogła zajmować położenie poziome po stronie niepracującej wiatraka, a jednocześnie nie mogła być siłą wiatru przerzucona przez żerdź, wzdłuż dolnego krańca płótna przyczepiony jest lekki pręt żelazny, uwiązany do dolnej żerdzi sznurkami określonej długości.

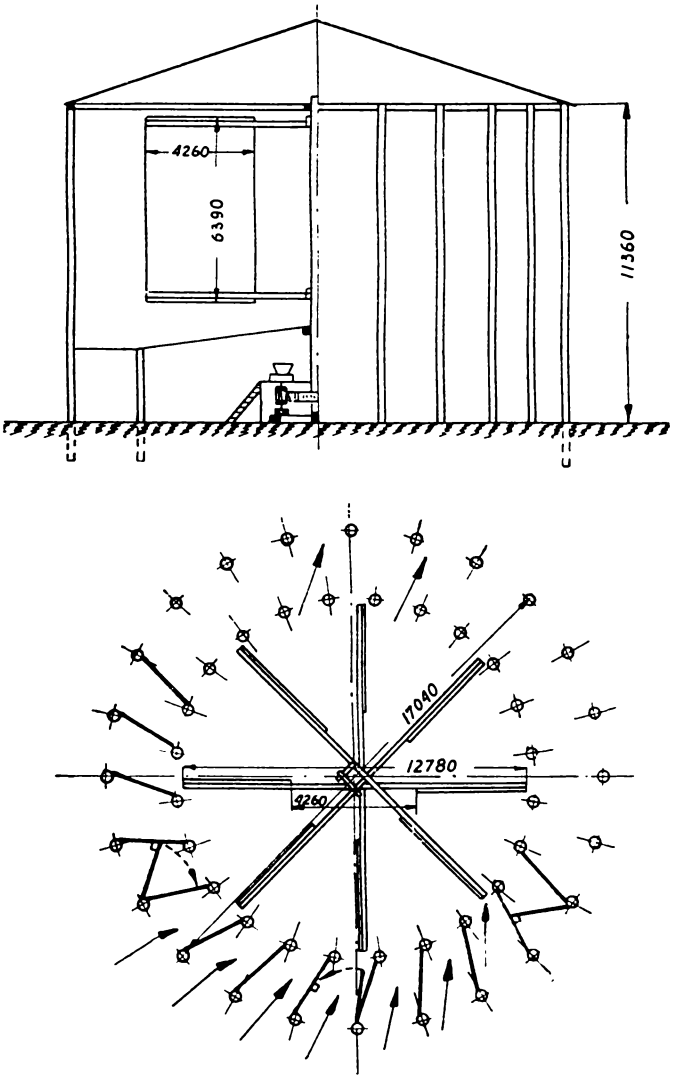


Rys. 80.

Dość oryginalną jest budowa karuzelowego wiatraka pomysłu Domnyszewa (rys. 81), zwanego w Rosji wiatrakiem typu polskiego. Wiatrak ten posiada osiem skrzydeł, przymocowanych do pionowego drewnianego wału. Na obwodzie dwu kół współśrodkowych z karuzelą skrzydłową wkopane są w ziemię w pobliżu tej ostatniej dwa rzędy słupów (∅ 25 cm), po 24 w rzędzie, w ten sposób, że słupy szeregu wewnętrznego wypadają w odstępach między słupami zewnętrznemi. Do każdych dwóch słupów, jednego zewnętrznego i drugiego wewnętrznego, przybite są zasłony z desek, tworzące w ten sposób rodzaj kierownic. Odpowiednio do kierunku wiatru zamyka się drzwiczkami przelot pomiędzy kierownicami z jednej strony wiatraka, otwiera zaś z drugiej, aby napór wiatru dopływającego do skrzydeł wywołał moment obrotowy.

Budowa ta jednak, mimo całej prostoty, nie rozpowszechniła się, ze względu na niedogodną czynność ustawiania zasłon.

Bardziej doskonałym jest wiatrak Rollanston'a, uwidoczniony na rys. 82. Na wieży P umieszczony jest pomost a-b, na którym zbudowana jest klatka S-S. W osi klatki znajduje



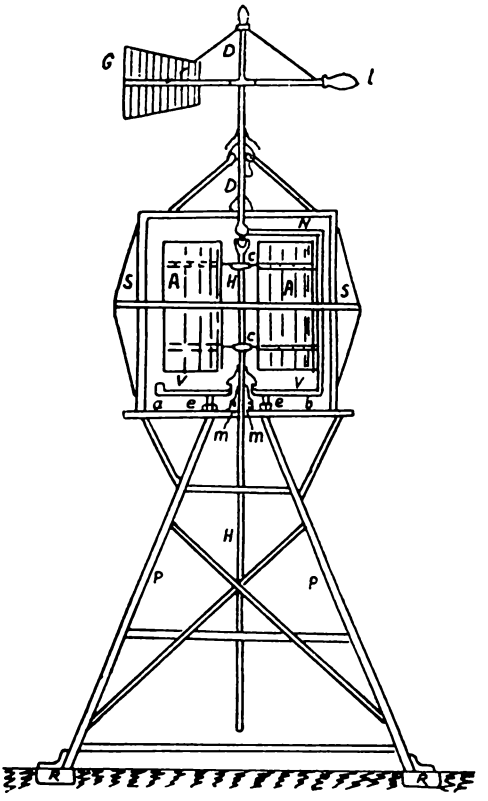
Rys. 81.

się pionowy wał H z sześcioma wygiętemi skrzydłami A, wirujący w łożyskach kulkowych m.

Charakterystyczną część silnika stanowi samoustawna zasłona N o powierzchni walcowej, przytwierdzona u dołu do

beleczek *V*, ułożonych promieniowo i obracających się dokoła osi *H*. Do belek *V* przymocowane są od dołu rolki *e*, toczące się po pomoście klatki *S-S*. Od góry zasłona związana jest sztywno z pionową osią *D* steru *Gl*, podpartą łożyskiem stopowem *i*, wbudowanem w zakończeniu wału *H*, i obracającą się w łożyskach *f* i *f'*, osadzonych w daszku klatki *S*. Ster *Gl*, zajmując stale położenie zgodne z kierunkiem wiatru, ustawia zasłonę *N* w ten sposób, by zamykała dopływ powietrza do jednej lub drugiej połowy łopatek wirnika.

Wiatraki Rollanston'a budowane były o średnicy od 2,5 do 12 m. Według obliczeń konstruktora, moc silnika przy szybkości wiatru około 2 m/sek wynosi 1 KM z każdych 7 m² powierzchni skrzydeł.

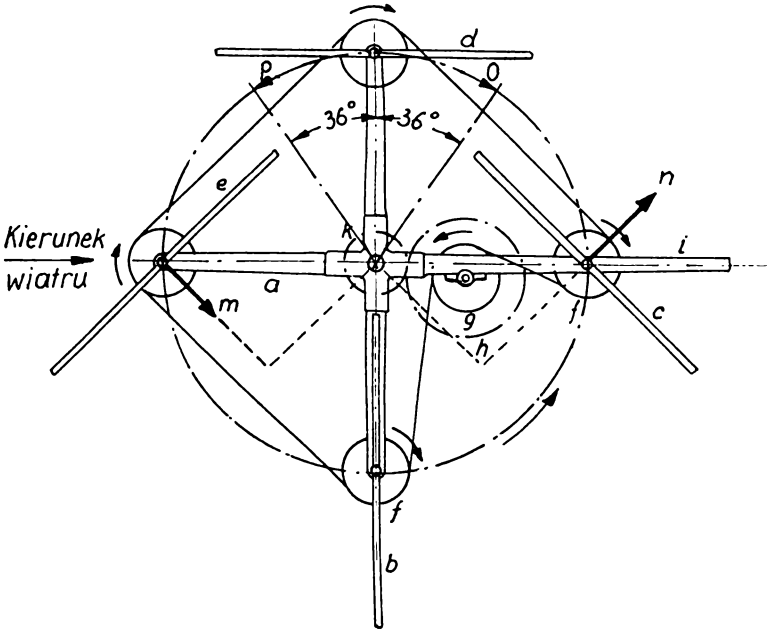


Rys. 82.

W rozmaitych silnikach wietrznych typu omawianego pracuje zazwyczaj zaledwie połowa, a nawet mniej niż połowa wirnika. Pod tym względem bardziej udoskonalony jest silnik pomysłu Jacsona, którego skrzydła pracują na drodze, odpowiadającej 0,8 obrotu. Budowę i działanie tego silnika wyjaśnia rys. 83. Na czterech ułożonych poziomo na krzyż ramionach *a*, obracających się dokoła osi pionowej, osadzone są również na osiach pionowych cztery skrzydła *b*, *c*, *d* i *e*. Skrzydła te posiadają płaszczyzny symetryczne względem swych osi, dokoła których mogą się obracać. Każde skrzydło zaopatrzone jest w przytwierdzone doń nieruchomo i obracające się wraz z nim koło zębate *f*. Łańcuch bez końca, Galla, opasuje wszystkie cztery koła *f*, a oprócz tego zazębia się z kołem *g* o tej samej średnicy, osadzonem na osi obrotu przymocowanej do jednego z ramion *a*. Z kołem *g* złączone jest współosiowo koło zębate *h*,

zazębiające się z osadzonem na osi głównej wiatraka i mogącem się dokoła niej obracać kołem *k*, nieruchomo związanem ze sterem *l*. Koło *k* posiada średnicę dwa razy mniejszą od średnicy koła *h*. Przy obrocie skrzydeł koło *h* toczy się po nieruchomem kole *k*, w kierunku odwrotnym do kierunku obrotu wirnika i z prędkością dwa razy mniejszą. Wraz z kołem *h* obraca się również koło *g*, połączone łańcuchem Galla z kołami *f*, powodując przy pełnym obrocie wirnika dokoła osi głównej pół obrotu skrzydła dokoła jego osi, t. j. o 180° również w kierunku odwrotnym do kierunku wirowania ramion.

Kierunek wiatru i kierunki obrotu poszczególnych części



Rys. 83.

wskazują na rysunku strzałki. Ustawienie mechanizmu jest takie, że każde skrzydło w położeniu *b* całą swą płaszczyznę skierowaną ma przeciwko wiatrowi. Ponieważ na jeden obrót wiatraka przypada pół obrotu (180°) koła *g*, a więc i koła *f* wraz ze skrzydłem, to ostatnie przy przejściu z położenia *b* do położenia *c* obróci się dokoła swej osi o kąt 45°. W położeniu *d* płaszczyzna skrzydła staje się zgodną z kierunkiem wiatru, w położeniu zaś *e* tworzy z tym ostatnim kąt 45°.

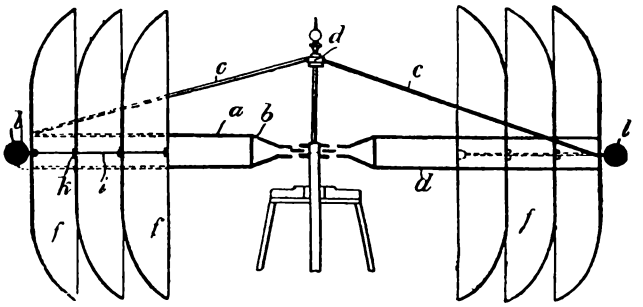
Podczas pełnego obrotu wirnika skrzydła ustawiają się w ten sposób względem kierunku wiatru, że każde z nich pra-

cuje na 0,8 swej drogi (288°), a tylko na 0,2 drogi (72°), t. j. od *O* do *P*, stwarza pod naciskiem wiatru moment obrotowy hamujący. W położeniach *O* i *P* reakcja skrzydeł przechodzi przez oś wirnika, dając moment równy zeru.

Zadanie ustawiania wiatraka odpowiednio do kierunku wiatru spełnia ster *l*. Zatrzymanie silnika osiąga się przez ręczne okręcenie wirnika *k* do położenia, w którem nacisk wiatru na skrzydła wywołuje momenty równe, lecz w przeciwnych kierunkach.

Na innej zasadzie zbudowany jest wiatrak o osi pionowej pomysłu inż. Rychłowskiego. Szczególnie osobliwe jest rozwiązanie konstrukcji skrzydeł tego silnika (rys. 84 i 85).

Skrzydła te wygięte są i rozmieszczone w ten sposób, że stawiają mniejszy opór przy obrocie, a oprócz tego tak ustawiają się samoczynnie, że wykorzystują energję wiatru w więk-



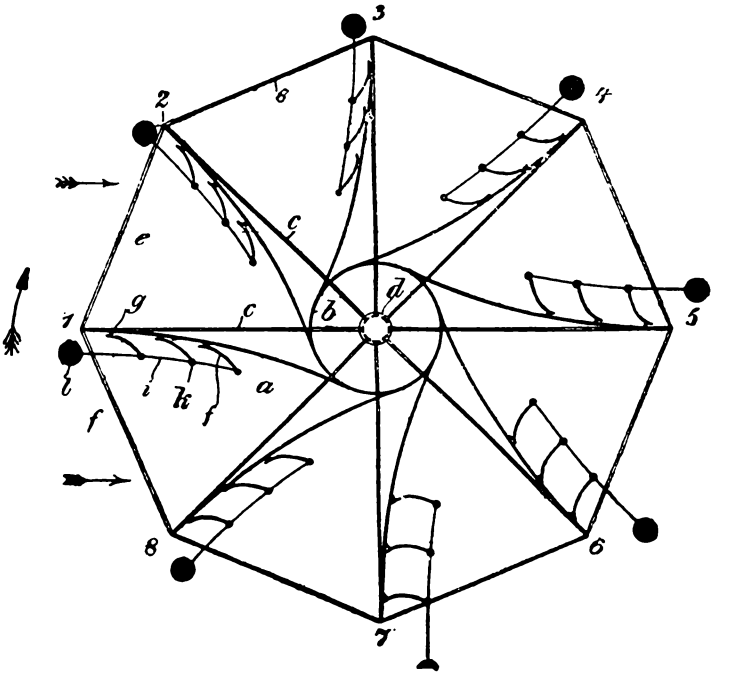
Rys. 84.

szym stopniu niż poprzednio opisane. Na rys. 84 pokazany jest widok silnika z boku, na rys. 85 — rzut poziomy. Liczba ramion może być rozmaita. Każde z nich składa się z żelaznej listwy *a*, zakrzywionej w ten sposób, by przy obrocie wirnika stawiała możliwie najmniejszy opór, a składowa siły naporu wiatru prostopadła do krzywizny była największa. Kształt tej krzywizny nie jest teoretycznie ustalony, można jedynie twierdzić, że promień krzywizny listwy w pobliżu koła *b* winien być mniejszy, aniżeli na krańcach. Zewnętrzne końce listew powiązane są ze sobą cienkiemi prętami *e*, a oprócz tego związane z pierścieniem *d* zapomocą prętów *c*. Pierścień *d*, jak również i koło *b*, mogą być osadzone na wale nieruchomo i wtedy wirują wraz z nim, albo też swobodnie, gdy oś obrotu jest nieruchoma.

Do wklęsłej powierzchni listew przymocowane są łopatki *f* o kształtach skrzydeł ptasich i krzywiznach podobnych do wy-

gięcia listwy. Łopatki przyczepione są do listew zapomocą połączeń sprężynowych, a zewnętrzne końce ich powiązane przegubowo cięgnami *k*, których końce zaopatrzone są w ciężary *l*. Sprężyny są tak dobrane, że przy wietrze średniej szybkości skrzydła ustawiają się przeciwko wiatrowi w położeniu najkorzystniejszem (rys. 85, ramię 1). Przy większych prędkościach wiatru i obrotu silnika ciężary *l*, wskutek przyrostu siły odśrodkowej, napinają połączenia sprężynowe, ustawiając skrzydła w położeniu, w którem stopień wyzyskania siły wiatru maleje.

Istnieje jeszcze wiele innych silników wietrznych z osią



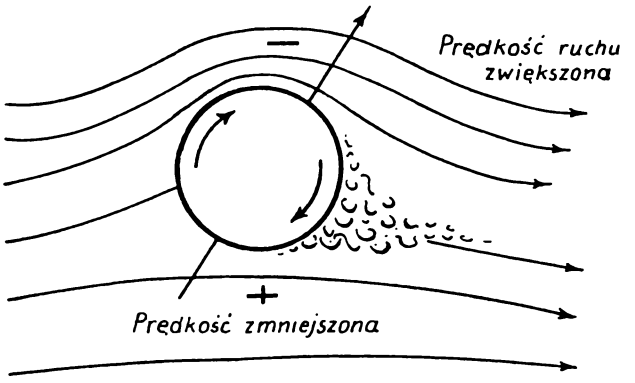
Rys. 85.

obrotu pionową, mniej lub więcej podobnych do typów opisanych, silniki te jednak nie mają znaczenia praktycznego.

6. **Zjawisko Magnusa.** W 1852 r. niemiecki fizyk Magnus odkrył następujące zjawisko aerodynamiczne. Jeżeli pewne ciało, np. walec, wiruje w środowisku znajdującem się w ruchu, to powstają osobliwe siły zewnętrzne, dążące do przesunięcia go w inne położenie. Siły te powstają również w środowisku nieruchomem, gdy wirujące ciało jest jednocześnie w ruchu prostolinjowym, i skierowane są wpoprzek tego ostatniego. Ruch ciała staje się dzięki temu krzywolinjowy, przytem wygięcie

linij prądu skierowane jest w stronę, po której wskutek krążenia powstaje rozrzedzenie środowiska (rys. 86). Jeżeli, przeciwnie, symetryczne ciało, wirujące dokoła swej osi (kuła, walec), znajduje się w ruchu w pewnem środowisku, to powstaje krążenie środowiska dokoła tego ciała, wywołujące ciśnienia dodatnie i ujemne. Ciśnienia te oddziaływują na ciało wpoprzek kierunku ruchu środowiska, usiłując przesunąć je w stronę nacisków ujemnych.

7. **Silnik Flettner'a.** Flettner wykorzystał zjawisko Magnusa najpierw do uruchamiania statków morskich zapomocą dwu wielkich walców („rotorów"), wprawianych w ruch obrotowy małym silnikiem elektrycznym, potem dopiero w lądowych silnikach wietrznych.

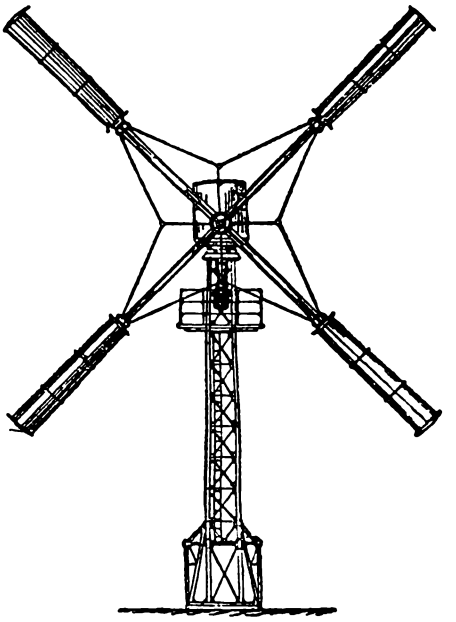


Rys. 86.

Pierwszy silnik rotorowy z czterema skrzydłami walcowemi o rozpiętości 20 m zbudowany został przez Flettnera w Berlinie w 1926 r. na wieży wysokości 15 m (rys. 87). Długość każdego walca (rotora), wykonanego z metalu lekkiego w kształcie stożka ściętego, wynosiła 5 m. Zewnętrzna średnica podstawy tego stożka równa była 900 mm, wewnętrzna zaś — 720 mm. Wewnątrz rotorów wbudowane były silniki elektryczne na prąd zmienny, wprawiające walce w ruch obrotowy.

Według zdania Flettnera, silniki jego będą mogły w przyszłości rozwijać bardzo dużą moc, zwłaszcza, gdy zastosuje do nich inną zasadę przejmowania energji wiatru i przesyłania jej do sieci elektrycznej. Mianowicie, zamiast, jak dotychczas, pobierać energję wirnika wietrznego z wału skrzydłowego, Flettner zamierza czerpać ją na obwodzie wirnika, t. j. z końców ramion. W tym celu na końcach ramion ponad walcami umiesz-

cza prądnice, zaopatrzone w śmigła. Urządzenie to Flettner nazwał aerotransformatorem (rys. 88). Przez takie rozwiązanie konstrukcyjne konstruktor dąży do zapewnienia prądnicy dostatecznie dużej liczby obrotów, przy małej bowiem liczbie

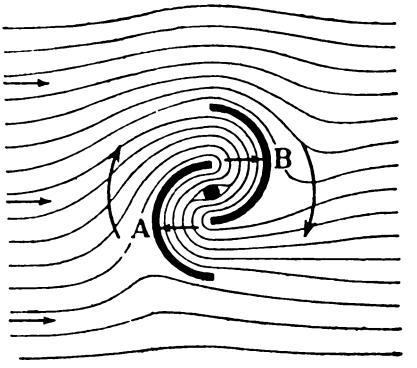


Rys. 87.

Rys. 88.

obrotów ramion wiatraka trudno jest osiągnąć duże prędkości wirowania prądnicy, sprzężonej bezpośrednio z wałem skrzydłowym.

Jeżeli koniec ramienia posiada prędkość obwodową cztery razy większą od prędkości wiatru, to przy tej ostatniej równej np. 8 m/sek prędkość ta wyniesie 32 m/sek. W stosunku do wiatru naturalnego 1 m² powierzchni nośnej śmigła prądnicy mógłby zatem wyzyskać 64 razy więcej energji. Innemi słowy, śmigła te mogą mieć znacznie mniejsze wymiary od skrzydeł głównych, przytem w wielu przypadkach stałyby się zbędne przekładnie zębate.



Rys. 89.

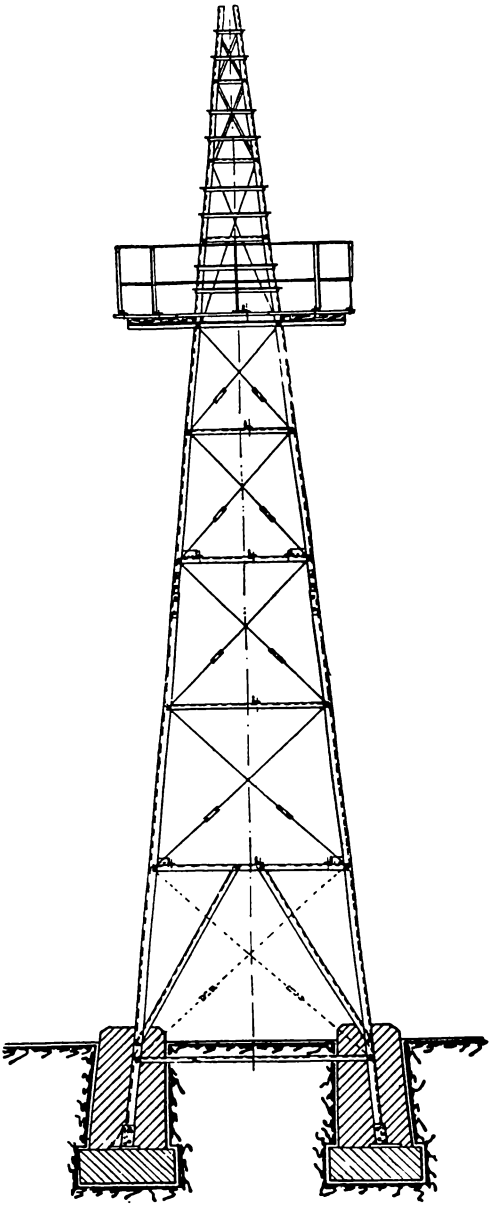
8. **Silnik Savonius'a.** Jeżelibyśmy rozcięli cylindryczny rotor Flettner'a wzdłuż osi pionowej na dwie części i przesunęli je względem siebie, to otrzymalibyśmy podstawowy kształt silnika, zaprojektowanego w r. 1925 przez finlandzkiego inżyniera Savonius'a (rys. 89 i 90). Silnik ten znany jest pod nazwą „wingrotor" co znaczy rotor skrzydłowy.

Liczne doświadczenia Savonius'a dowiodły, że moc silnika rośnie proporcjonalnie do rzutu powierzchni nośnej skrzydeł, przytem najkorzystniejszy stosunek t. zw. rozmachu, t. j. całkowitej szerokości skrzydeł, do ich wysokości wynosi 0,6 : 1. Jednakże rotory, ustawiane niezbyt wysoko ponad ziemią, mogą posiadać wysokość skrzydeł 3 do 5 razy większą od rozmachu. Prześwit między skrzydłami w płaszczyznach przecięcia wynosi około 1/5 rozmachu. Średnice krążków rotorów niewysokich wykonywa się większe o 1/8 całkowitej szerokości skrzydeł.

Rys. 90.

Silnik przedstawiony na rys. 90, przystosowany do pompowania wody, posiada wysokość skrzydeł równą 1,96 m; rozmach skrzydeł wynosi 0,96 m. Powierzchnia rzutu skrzydeł zatem równa się $1{,}96 \cdot 0{,}96 = 1{,}88$ m². Krążki wykonane z dykty posiadają średnice 1,2 m. Same skrzydła zrobione są z blachy żelaznej o grubości 0,75 mm. W krawędziach skrzydeł zawalcowany jest drut grubości 10 mm. Wał pionowy, w postaci rury stalowej o średnicy 50 mm, połączony sztywno z górnym i dolnym krążkiem, wiruje w dwu łożyskach kulkowych. Do dolnego końca wału przymocowany jest mimośród do napędu pompy. Doświadczenia Savonius'a wykazały, że przy jednakowych powierzchniach nośnych współczesnej turbiny wietrznej i „wingrotoru", wydajność tego ostatniego jest o 70% większa od wydajności turbiny.

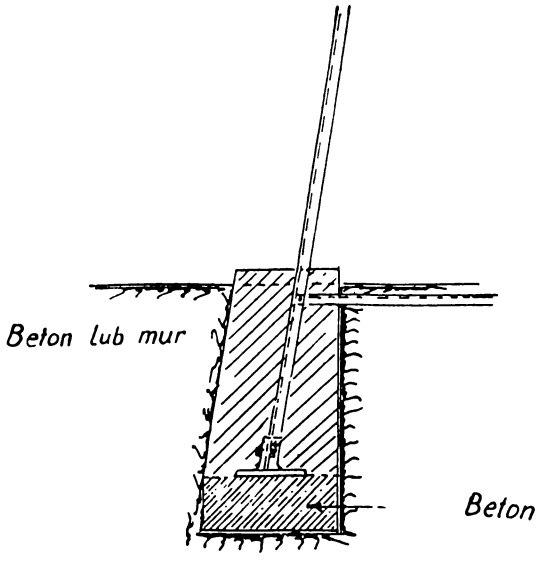
Silniki wietrzne typu rotorowego i wingrotorowego dopiero zaczynają wchodzić w użycie, to też brak jeszcze dokładnych danych co do ich pracy. W każdym razie zasada ich działania jest tak niezwykła, że zapoznanie się ze wspomnianym rodzajem silników staje się nieodzowne. Można przypuszczać, że nowoczesne silniki te mają widoki na rozpowszechnienie się w wielu dziedzinach techniki i życia gospodarczego, jak np. w wodociągach, przy osuszaniu gruntów i t. p. Dałyby się również łatwo zastosować w urządzeniach ruchomych, np. na parowozach do oświetlania pociągów lub też mogłyby znaleźć zastosowanie jako silniki wodne, nie wymagające spadków i mogące pracować przy zanurzeniu w bystrej rzece.



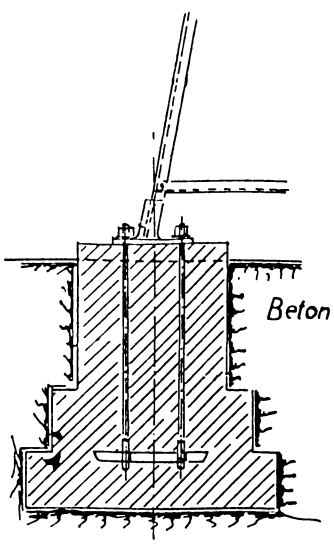
Rys. 91.

Silniki rotorowe i wingrotorowe o dużej mocy mogłyby nawet współzawodniczyć z wiatrakami typów obecnie używanych, posiadając bowiem prostszą budowę i prostszy mechanizm ruchu, nie wymagają budowy bardzo wysokich i kosztownych wież.

9. **Wieże.** Nowoczesne wirniki wietrzne, z wyjątkiem silników rotorowych i wingrotorowych, umieszcza się zazwyczaj na wysokich wieżach, najczęściej żelaznych lub drewnianych, jeżeli okolica obfituje w lasy.

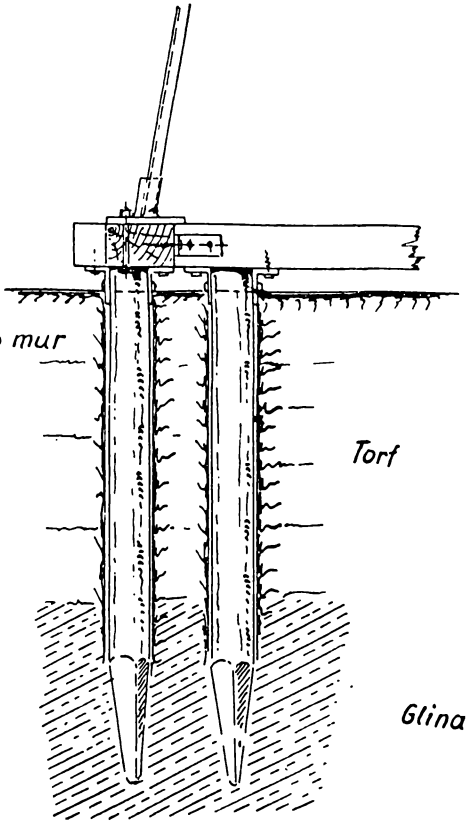


a



b

Rys. 92.



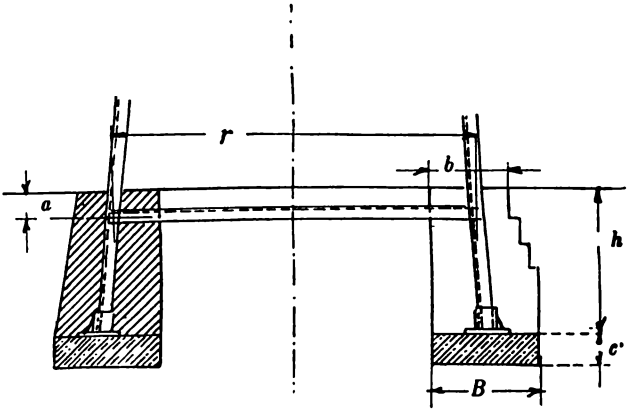
Rys. 93.

Wieże żelazne (rys. 91) zbudowane są zwykle z czterech dźwigarów narożnych, powiązanych poziomemi kątownikami i cięgnami przekątnemi, wykonanemi z okrągłych prętów żelaznych. Dla ułatwienia składania wieży nie znitowuje się poszczególnych części, lecz łączy się je śrubami. Nieco poniżej szczytu buduje się pomost z poręczami, umożliwiający dostęp do wirnika. Do wchodzenia na wieżę służy drabinka żelazna, umieszczona bądź nazewnątrz wieży, bądź też wewnątrz tej ostatniej, jeżeli wysokość jej jest znaczna, przytem robi się wtedy kilka pomostów na różnych wysokościach.

Wieże drewniane (rys. 57) mają wygląd ogólny i główne wymiary prawie takie same, jak żelazne.

Przekroje poprzeczne poszczególnych części wykonywa się zazwyczaj większe niż wynikające z rachunku, ponieważ drzewo szybko ulega gniciu. W celu zabezpieczenia budowy od przedwczesnego gnicia, najlepiej jest malować części drewniane farbą olejną lub też przesycać je karbolineum. Długotrwałość wieży w ten sposób zabezpieczonej od psucia się można przyjmować równą okresowi 10 lat.

Stateczność wieży zależy w dużej mierze od budowy jej podstawy, ta zaś od rodzaju gruntu.



Rys. 94.

W gruntach mocnych fundament wykonywa się oddzielnie pod każdą nogę wieży w sposób wskazany na rys. 92 (a lub b).

W przypadkach, gdy wieża ma stanąć na gruncie torfiastym, co zdarza się dosyć często przy osuszaniu ziem, budowa fundamentów betonowych lub z kamienia jest niemożliwa. Wieżę ustawia się wtedy na palach wbitych w ziemię na głę-

bokość sięgającą gruntu mocnego (rys. 93). Na palach tych układa się belki, do których przymocowuje się żelazne obramienie, stanowiące zakończenie dźwigarów narożnych. Lepsze rozwiązanie polega na obcięciu końców pali poniżej poziomu wód gruntowych i zabetonowaniu dźwigarów w fundamencie (rys. 92 a i b) wykonanym na ruszcie drewnianym. Sposób ten zabezpiecza drzewo od gnicia, a więc zapewnia trwałość podstawy.

Dla ułatwienia projektowania wież, przytaczam niżej dane orjentacyjne, dotyczące wymiarów fundamentów (rys. 94 i tabl. 19), zaczerpnięte z książki O. Stertz'a „Moderne Windturbinen".

TABLICA 19.

Średnica wirnika D m	mm	Wysokość wieży w m.								
		8	10	12	14	16	18	20	22	24
2,5÷3,5	*a*	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	b	510	640	640	770	900	900	900	1050	1050
	B	770	770	770	1050	1050	1160	1160	1160	1160
	h	1000	1000	1000	1200	1300	1400	1500	1650	1750
	c	250	250	250	250	250	250	250	250	250
3,5÷4,5	*a*	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	b	640	770	900	900	900	1050	1050	1160	1160
	B	770	900	900	1050	1050	1160	1290	1290	1290
	h	1100	1100	1200	1300	1400	1600	1800	1800	1850
	c	250	250	250	250	250	250	250	250	250
4,5÷5,5	*a*	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	b	770	900	900	900	900	1050	1050	1160	1160
	B	900	1050	1160	1160	1290	1290	1290	1420	1420
	h	1150	1150	1300	1400	1600	1750	1850	1950	2000
	c	300	300	300	300	300	300	300	300	300
5,5÷6,5	*a*	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	b	900	1050	1050	1050	1050	1160	1160	1290	1290
	B	1160	1160	1160	1290	1290	1420	1420	1550	1550
	h	1000	1250	1400	1500	1700	1900	2100	2100	2150
	c	350	350	350	350	350	350	350	350	350
6,5÷8,5	*a*	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	b	1000	1050	1050	1160	1160	1160	1160	1290	1420
	B	1250	1290	1290	1420	1420	1420	1420	1550	1680
	h	1300	1350	1500	1600	1800	2000	2150	2150	2200
	c	400	400	400	400	400	400	400	400	400
8,5÷12,0	*a*	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	b	1050	1160	1160	1290	1290	1420	1420	1550	1550
	B	1200	1290	1420	1420	1550	1680	1680	1680	1810
	h	1400	1450	1600	1700	1900	2100	2300	2400	2550
	c	450	450	450	450	450	450	450	450	450

Wymiary poszczególnych części wieży oblicza się, przyjmując do rachunku ciśnienie wiatru na 1 m² powierzchni wieży równe 150 kg/m², co odpowiada prędkości wiatru około 40 m/sek[1]).

Na wieżę działają następujące siły poziome i pionowe:

Siły poziome:

1. parcie wiatru na wirnik oraz inne części silnika wietrznego,
2. suma poszczególnych nacisków wiatru na płaszczyzny części wieży, przytem przyjmuje się, że wiatr działa odrazu na dwa boki wieży.

6 iły pionowe:

1. ciężar silnika,
2. ciężar własny wieży.

Naprężenia panujące w poszczególnych dźwigarach i prętach wieży wyznacza się najczęściej wykreślnie. Na rys. 95 podany jest wykres sił w wieży o wysokości 12 m.

W celu zapewnienia wieży stateczności przyjmuje się zazwyczaj stosunek szerokości podstawy do wysokości równy 1 : 4,5.

Wypadkowa sił wiatru działa na wieżę w pewnej odległości od podstawy. Odległość tę można wyznaczyć również wykreślnie lub analitycznie. Wypadkowa sił stwarza moment, usiłujący przewrócić wieżę, który równoważy częściowo moment pochodzący od sił ciężaru silnika i wieży, częściowo zaś od reakcji zamocowania nóg.

Dopuszczalne naprężenie w prętach przyjmuje się 750 kg/cm².

Dla przykładu przytaczam obliczenie wieży o wysokości 12 m, służącej do podtrzymywania wirnika wietrznego o rozpiętości skrzydeł 6 m.

A. Siły poziome.

Całkowita powierzchnia skrzydeł, wynosząca 18 m², zmniejsza się samoczynnie przy nadmiernej szybkości wiatru do 2 m². Powierzchnia dźwigarów i wiązań wieży, stawiająca opór sile wiatru, wynosi 4 m². Siły poziome zatem będąnastępujące:

1) Parcie wiatru na wirnik: $150 \cdot 2 = 300$ kg.

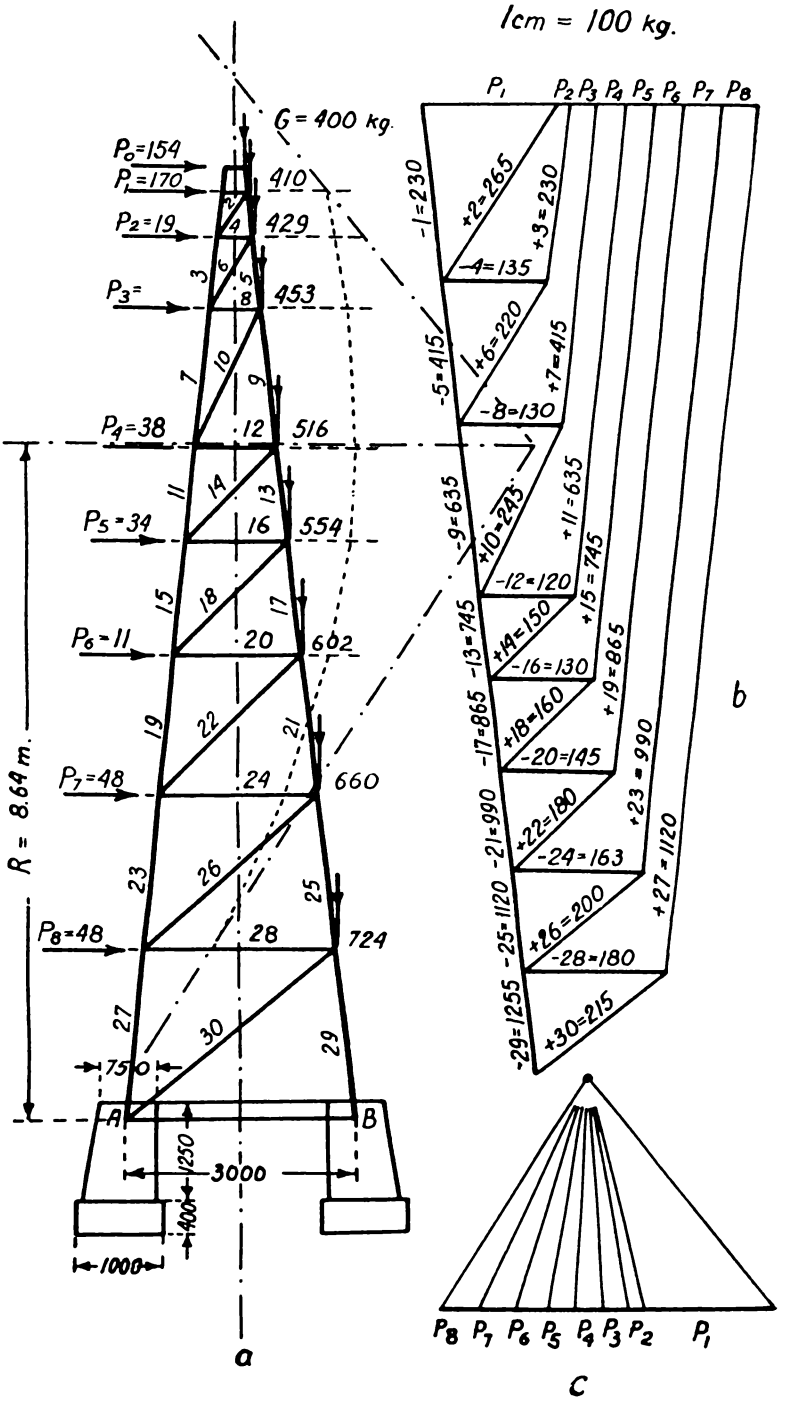
Na jeden bok wieży przypada zatem $\frac{300}{2} = 150$ kg.

2) Parcie wiatru na wieżę: $150 \cdot 4 = 600$ kg.

Na jeden metr bieżący narożnika wieży przypada więc $\frac{600}{2 \cdot 12} = 25$ kg.

---

[1]) Ciśnienie wiatru na 1 m² można otrzymać ze wzoru: $p = C_x \frac{\gamma}{2} 1 \cdot v^2$; dla płatu $C_x = 1{,}3$ (str. 33); $\frac{\gamma}{2} = \frac{1}{16}$; więc, $p = 0{,}081\ v^2$ kg/m².


1cm = 100 kg.
G = 400 kg.
P0=154
P1=170
P2=19
P3=
P4=38
P5=34
P6=11
P7=48
P8=48
410
429
453
516
554
602
660
724
R = 8.64 m.
750
1250
3000
1400
1000
A
B
a
P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8
-1=230
+2=265
+3=230
-4=135
-5=415
+6=220
+7=415
-8=130
-9=635
+10=245
+11=635
-12=120
-13=745
+14=150
+15=745
-16=130
-17=865
+18=160
+19=865
-20=145
-21=990
+22=180
+23=990
-24=163
-25=1120
+26=200
+27=1120
-28=180
-29=1255
+30=215
b
P8 P7 P6 P5 P4 P3 P2 P1
c

Rys. 95.

Siły działające na poszczególne węzły wieży:

$$P_0 = 150 + \frac{0{,}3}{2} \cdot 25 = 154 \text{ kg}$$

$$P_1 = \frac{154 \cdot 12}{11{,}7} + \frac{0{,}3 + 0{,}6}{2} \cdot 25 = 170 \text{ kg}$$

$$P_2 = \frac{0{,}6 + 0{,}9}{2} \cdot 25 = 19 \text{ kg}$$

$$P_3 = \frac{0{,}9 + 1{,}8}{2} \cdot 25 = 34 \text{ ,,}$$

$$P_4 = \frac{1{,}8 + 1{,}2}{2} \cdot 25 = 38 \text{ ,,}$$

$$P_5 = \frac{1{,}2 + 1{,}5}{2} \cdot 25 = 34 \text{ ,,}$$

$$P_6 = \frac{1{,}5 + 1{,}8}{2} \cdot 25 = 41 \text{ ,,}$$

$$P_7 = \frac{1{,}8 + 2{,}0}{2} \cdot 25 = 45 \text{ ,,}$$

$$P_8 = \frac{2{,}0 + 2{,}2}{2} \cdot 25 = 48 \text{ ,,}.$$

B. Siły pionowe.

1) Ciężar silnika wietrznego wynosi 1600 kg, czyli na każdy dźwigar przypada $\frac{1600}{4} = 400$ kg.

2) Ciężar własny wieży stanowi 1550 kg, czyli na 1 m bież. jednego dźwigara przypada $\frac{1550}{4 \cdot 12} = 32$ kg.

Siły działające na poszczególne węzły:

$$G_0 = \ldots\ldots 400 \text{ kg}$$

$$G_1 = 400 + 0{,}3 \cdot 32 = 410 \text{ ,,}$$

$$G_2 = 410 + 0{,}6 \cdot 32 = 429 \text{ ,,}$$

$$G_3 = 429 + 0{,}9 \cdot 32 = 458 \text{ ,,}$$

$$G_4 = 458 + 1{,}8 \cdot 32 = 516 \text{ ,,}$$

$$G_5 = 516 + 1{,}2 \cdot 32 = 554 \text{ ,,}$$

$$G_6 = 554 + 1{,}5 \cdot 32 = 602 \text{ ,,}$$

$$G_7 = 602 + 1{,}8 \cdot 32 = 660 \text{ ,,}$$

$$G_8 = 660 + 2{,}0 \cdot 32 = 724 \text{ ,,}.$$

C. Stateczność wieży.

Wypadkowa sił parcia wiatru działa na wieżę, jak wynika z wykresu, na wysokości $R = 8{,}64$ m od podstawy. Odległość tę można również wyznaczyć analitycznie, mianowicie:

$$R=\frac{170\,.\,11{,}95+19\,.\,11{,}35+34\,.\,10{,}45+38\,.\,8;65+34\,.\,7{,}46+41\,.\,5{,}95+45\,.\,4{,}15+48\,.\,2{,}15}{170+19+34+38+34+41+45+48},$$

skąd $R=8{,}64$ m.

Moment sił poziomych M_1, usiłujący przewrócić połowę wieży dokoła punktu B, równa się

$$M_1=429\,.\,8{,}64=3707 \text{ kgm.}$$

Moment sił pionowych M_2, przeciwdziałający momentowi M_1, wynosi:

$$M_2=\frac{1550+1600}{2}\,.\,1{,}5=2162 \text{ kgm}$$

Różnica zatem

$$M_1-M_2=3707-2162=1545 \text{ kgm.}$$

daje moment wypadkowy, który musi być zrównoważony przez moment względem punktu B reakcji zamocowania przedniego A; ponieważ ramię tego momentu wynosi 3 m, przeto reakcja podpory w A musi się równać

$$T=\frac{1545}{3}=515 \text{ kg.}$$

Reakcja T pochodzi od ciężaru fundamentu, przeciwdziałającego wyrwaniu tego ostatniego z ziemi.

Fundament każdej nogi wykonany jest z betonu w kształcie ostrosłupa ściętego o wymiarach podstawy dolnej 0,9 × 0,9 m, górnej 0,75 × 0,75 m i wysokości 1,25 m; 1 m³ tego fundamentu waży 1600 kg. Zatem ciężar fundamentu jednej nogi, wynoszący

$$\frac{0{,}75^2+0{,}90^2}{2}\,.\,1{,}25\,.\,1600=1372 \text{ kg,}$$

znacznie przewyższa wymaganą reakcję 515 kg.

Ważnem jest również określenie ciśnienia fundamentu, dźwigającego wieżę wraz z silnikiem, na grunt, które dla gruntów średnich nie powinno przekraczać 2,5 kg/cm².

W danym przypadku największe ciśnienie na grunt wynosi:

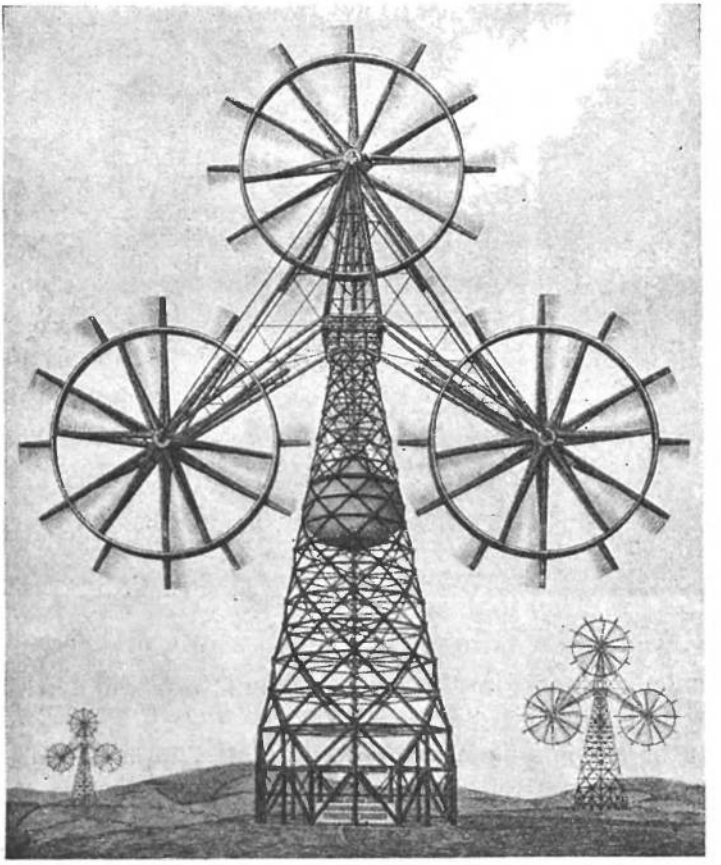
$$\frac{1255+724+1372}{0{,}9\,.\,0{,}9\,.\,10000}=\frac{3351}{8100}=0{,}41 \text{ kg/cm}^2<2{,}5 \text{ kg/cm}^2.$$

Wymiary części żelaznych wieży określa się na podstawie wyznaczonych wykreślnie naprężeń oraz naprężenia dopuszczalnego. Wyniki obliczeń zestawia się zazwyczaj w tablice, której wzór podany jest niżej (tab. 20).

TABLICA 20

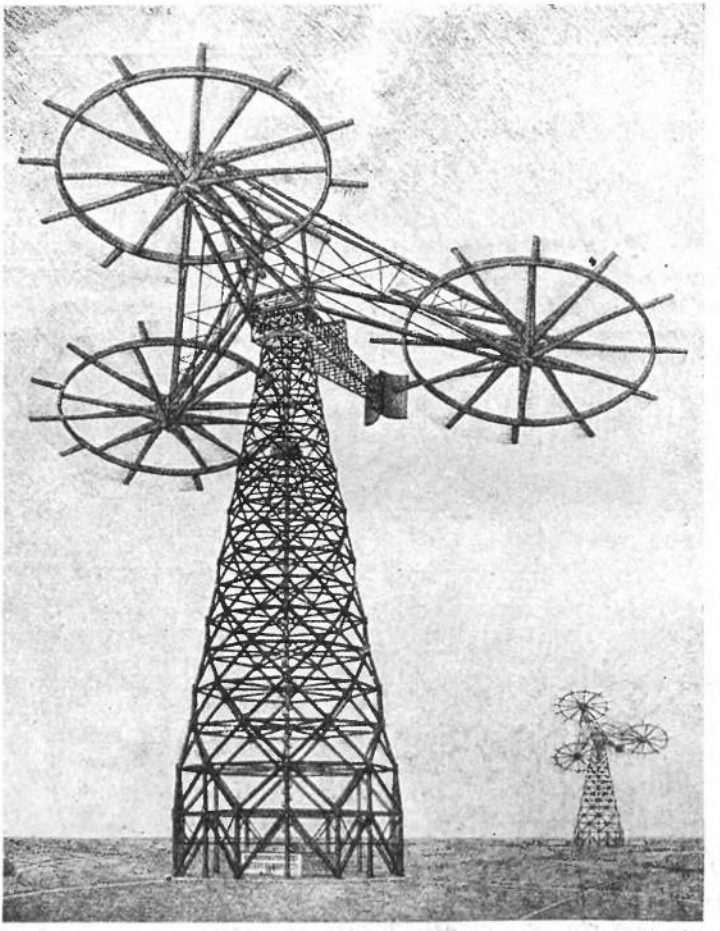
Nr. pręta	Naprężenie wskutek parcia wiatru kg	Naprężenie pochodzące od ciężarów kg	Największe naprężenie kg	Długość pręta	Konieczny moment bezwładności pręta J_0 cm⁴	Konieczny przekrój pręta $F_0 = \frac{P}{750}$ cm²	Wymiar kształtownika	Moment bezwładności kształtownika J cm⁴	Pole przekroju kształtown. F cm²
Dźwigar narożny									
—29	1255	724	1979	1,8	16,00	2,64	kątownik 70×70×8	19,80	10,65
Pręty wiążące									
+30	215	—	215	—	—	0,287	∅14 mm	—	1,31

10. **Wyzyskanie wiatrów górnych.** Przed paroma miesiącami zaledwie ogłoszony został (w prasie i broszurze) nowy projekt



Rys. 95 a.

urządzenia silnikowego, mającego na celu wyzyskanie wiatrów górnych (300 — 500 m), które są bardziej stałe i bardziej silne, niż wiatry dolne. Omawiany projekt dąży przytem do utworzenia silników o bardzo dużych mocach, tak że miałyby one już nie lokalne znaczenie, jako środek napędu tych lub innych stosunkowo drobnych instalacyj, lecz uzyskałyby



Rys. 95 b.

znaczenie równorzędne z urządzeniami wielkich elektrowni cieplnych i wodnych.

Autor wspomnianego projektu, H. Honnef, opisał go w książce p. t. „Windkraftwerke" (wyd. Vieweg und Sohn, Brunświk 1932).

Ogólne pojęcie o projektowanych siłowniach wietrznych mogą dać załączone rysunki 95a i b. Widzimy na nich wie-

żę o wysokości conajmniej 250 m, na której mieści się silnik o 3—5 kołach wietrznych o średnicy 150—160 m. Cały ten układ kół może być automatycznie regulowany zarówno w stosunku do kierunku wiatru, jak też do jego siły, przyczem mogą być wyzyskane wiatry o szybkości nawet 15 m/sek. Przy wiatrach silniejszych koła przybierają automatycznie położenie wskazane na rys. 95b. Według obliczeń Honnef'a, jedna taka siłownia może dać do 100000 kW mocy, w ciągu zaś roku może wytworzyć około 35 000 000 kWgodz. Cenę instalacji oblicza autor na 4 500 000 mk. niem., roczne wydatki wynosiłyby 405 000 mk. niem., 1 kWgodz. kosztowałaby 0,71 fen., wobec obecnej średniej ceny w Niemczech 2,31 fen. za 1 kWgodz.

Pomysł Honnef'a, jako nie tylko nie zrealizowany, a więc nie wypróbowany, ale nawet nie opracowany jeszcze w całokształcie, nie ma obecnie praktycznego dla Polski znaczenia, jest jednakże interesujący jako nowa myśl, która może otworzyć w przyszłości nowe drogi rozwoju silników wietrznych.

ROZDZIAŁ VI.

Zastosowanie silników wietrznych.

Urządzenia wodociągowe. — Odwadnianie i nawadnianie gruntów. — Zastosowanie wiatraków do zalewania stawów rybnych. — Zastosowanie wiatraków w młynarstwie oraz do napędu maszyn rolniczych. Zastosowanie silników wietrznych w różnych gałęziach przemysłu — Zastosowanie silników wietrznych do wytwarzania energji elektrycznej.

Zakres zastosowań silników wietrznych obejmuje bardzo liczne gałęzie przemysłu, nie wymagające jednak dużej regularności ruchu i odbioru energji w pewnych ściśle określonych godzinach. Na przeszkodzie stoi tu mianowicie charakter źródła energji, t. j. nieregularność wiatrów.

Większość silników wietrznych stosowana jest do pompowania wody do najbardziej różnorodnych celów; pozatem wiele takich silników pracuje w rozmaitych urządzeniach rolniczych lub przedsiębiorstwach rzemieślniczych.

W dalszym ciągu omówię zastosowanie silników wietrznych w następujących gałęziach gospodarstwa:

1) W urządzeniach wodociągowych,
2) do odwadniania i nawadniania pól,
3) w przedsiębiorstwach gospodarstw rolnych i rzemieślniczych oraz
4) do zasilania energją elektryczną małych miejscowości zaludnionych lub oddzielnych budynków.

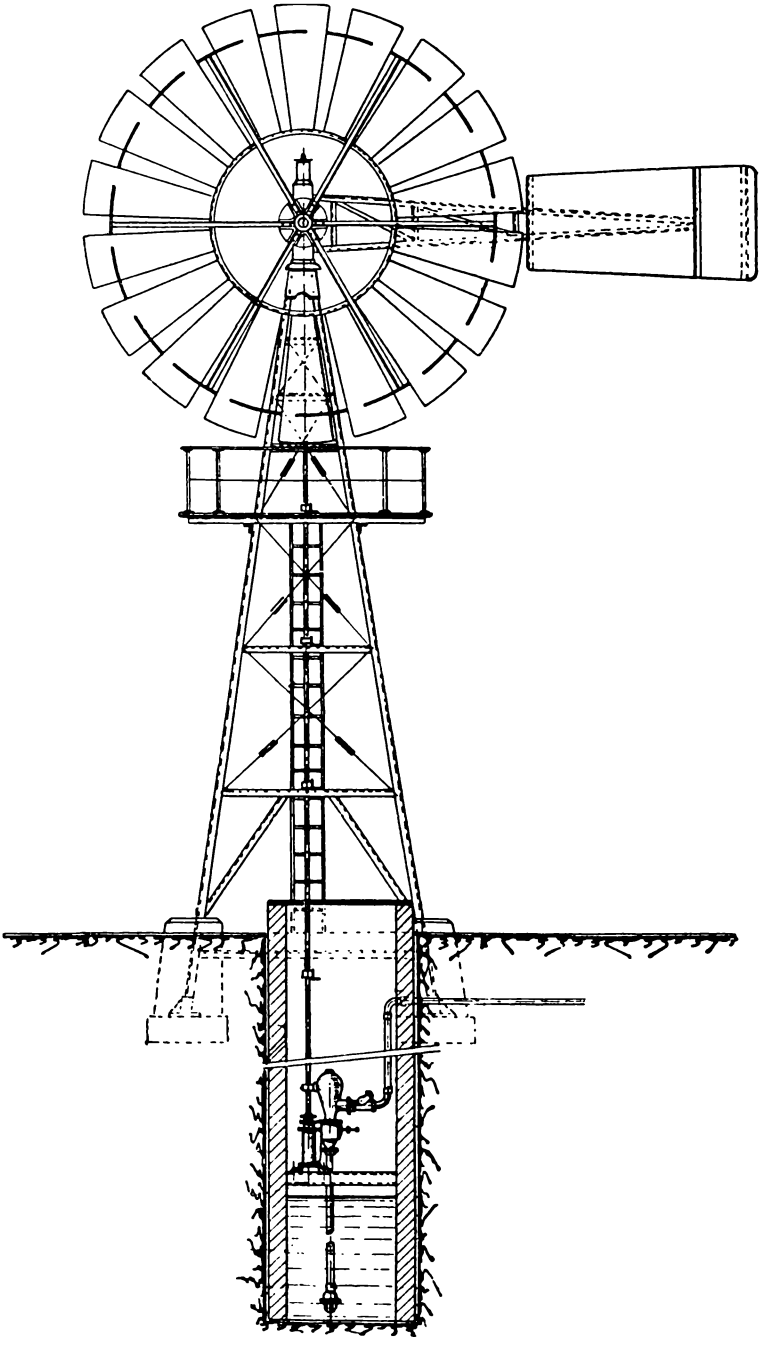
1. **Urządzenia wodociągowe.** Czysta i świeża woda jest jednym z najważniejszych warunków zdrowotności mieszkańców. Bardzo często jednak ludność wiejska, zamieszkująca nawet w pobliżu rzek, używa wody brudnej lub w każdym razie nie nadającej się do spożycia. Budowa wodociągów lub głębokich studzien, zaopatrzonych w pompy napędzane zapomocą silników cieplnych, pociąga często za sobą duże koszty utrzymania i ruchu. Zastosowanie silników wietrznych może tu przynieść duże korzyści.

Dla ułatwienia określenia ilości wody, niezbędnej do zaspokojenia potrzeb miejscowych, podaję nieco liczb, dotyczących zapotrzebowania wody do poszczególnych celów:

1 człowiek zużywa	od 30 do 50	l na dobę
1 koń „	50	„ „ „
1 krowa „	50	„ „ „
1 cielę „	20	„ „ „
1 szt. trzody chlewnej „	15	„ „ „
1 owca „	5	„ „ „
na 1 m^2 powierzchni ogrodów potrzeba	1,5	„ „ „
„ 1 wannę	200—300	„
„ 1 natrysk	20—30	„
„ 1 przemycie miski ustępowej	6—15	„
w szkołach na 1 ucznia przypada	2	„ na dobę
„ szpitalach na 1 chorego „	100—150	„ „ „
„ rzeźniach na 1 sztukę bydła „	200—400	„

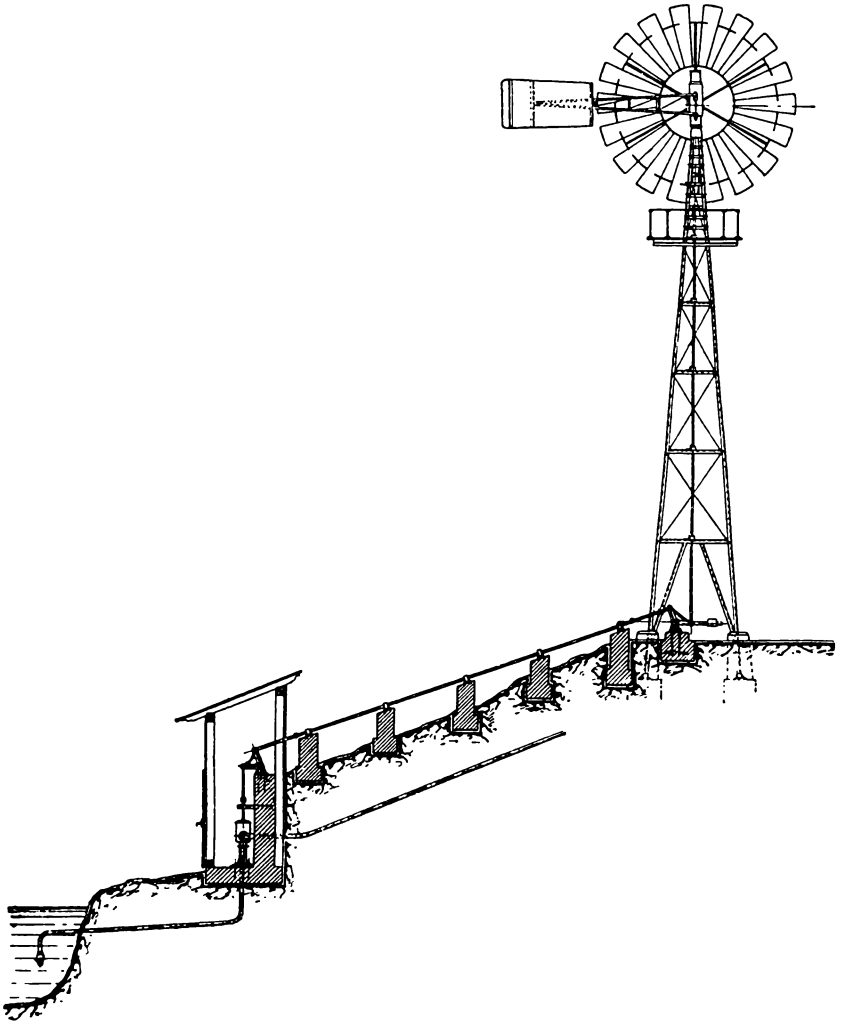
Na podstawie tych danych oraz liczby godzin przewidywanego panowania wiatrów można obliczyć wielkość pomp. Dzieląc, mianowicie, dobowe zapotrzebowanie wody przez liczbę godzin trwania wiatru, znajdziemy konieczną wydajność pomp w ciągu godziny. Przy projektowaniu wszelkich urządzeń tego rodzaju należy dążyć do budowy możliwie prostej, zwłaszcza mechanizmów pośredniczących w przenoszeniu ruchu od silnika do pompy. Sama pompa winna być umieszczona jak najbliżej dolnego zwierciadła wody, aby długość rur ssących była możliwie mała, wysokość ssania zaś nie większa ponad 7 m. Jeżeli całkowita wysokość pompowania nie przewyższa 7 m, to pompa może być tylko ssąca; po przekroczeniu tej granicy należy już stosować pompy ssąco-tłoczące.

Do napędu pomp zasilających wodociągi używa się najczęściej silników wieloskrzydłowych (turbin wietrznych). Przenoszenie ruchu od wirnika do pompy odbywać się może w sposób dwojaki: a) zapomocą długiego drąga, spełniającego rolę korbowodu, lub b) za pośrednictwem wału pionowego i przekładni.



Rys. 96.

Najprostszy schemat urządzenia do pompowania przedstawiony jest na rys. 96. Wykorbienie wału skrzydłowego przenosi ruch bezpośrednio na drąg tłokowy pompy, umieszczonej w studni tuż ponad zwierciadłem wody. Drąg ten wykonany jest z rur połączonych długiemi mufami. W urządzeniach po-



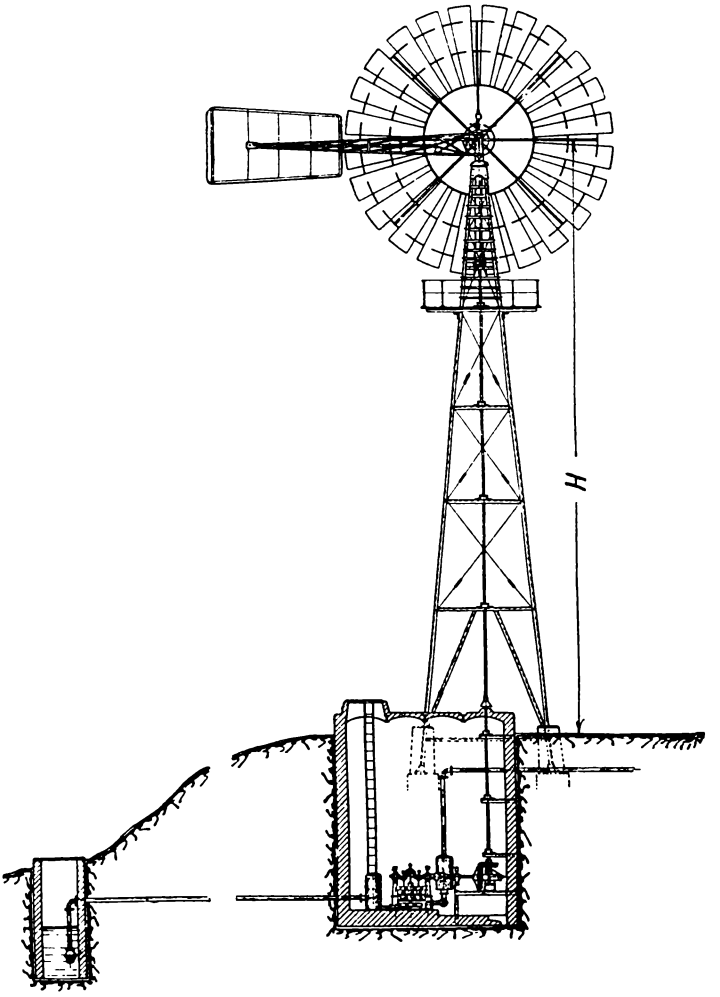
Rys. 97.

dobnych celowe jest ustawianie prostych pomp jednostronnego działania, aby długi drąg tłokowy pracował głównie na rozciąganie.

Jeżeli jako źródło wody służyć ma nie studnia, lecz jezioro, rzeka lub strumień, to silnik wietrzny ustawia się w pewnej

odległości od niego, pompę zaś w pobliżu tego źródła. W urządzeniu przedstawionem na rys. 97 odpowiedni układ dźwigni przenosi ruch pionowego drąga wiatraka na tłoczysko pompy.

Do pompowania dużych ilości wody lub na znaczne wysokości stosuje się silniki wietrzne podobnego typu, lecz z wi-

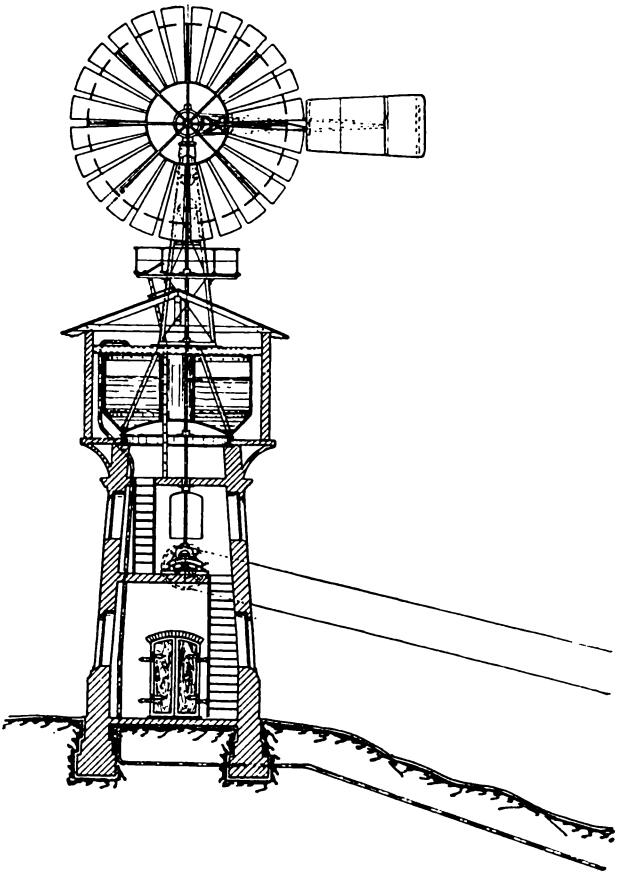


Rys. 98.

rującym wałem pionowym. Sprzężone z silnikiem pompy powinny przytem posiadać budowę, zapewniającą pracę spokojną i możliwie bez uderzeń.

Pompy odśrodkowe do tego celu zazwyczaj nie nadają się, ponieważ praca ich wymaga stałej i wielkiej liczby obrotów (900 do 2500 obr./min), podczas gdy turbiny wietrzne rozwi-

jają zaledwie od 10 do 100 obrotów na minutę. W praktyce ustawia się często pompy nurnikowe dwu lub trójcylindrowe



Rys. 99.

(rys. 98). Pompy wielocylindrowe pracują znacznie równomierniej niż pompy jednocylindrowe, zapewniając spokojny ruch wału korbowego, otrzymującego napęd od wału pionowego za pośrednictwem stożkowej przekładni zębatej.

Jeżeli okolica nie jest równinna, a różnice wzniesień są duże, to urządzenie pompowe może być wykonane według schematu, przedstawionego na rys. 99. Charakterystyczną dla tego urządzenia jest przekładnia linowa oraz budowa wieży ciśnień.

Silniki wietrzne mogą być również stosowane do napędu pomp, obsługujących głębokie studnie wiercone (rys. 100). Obrotowy ruch pionowego wału wiatraka przenosi również

i tutaj na wał korbowy pompy stożkowa przekładnia kół zębatych. Cylinder pompy umieszczony jest w rurze studziennej na głębokości zapewniającej ssanie bez obawy oderwania się wiszącego słupa wody.

Duże pompy powinny pracować z małą liczbą obrotów, nie przekraczającą 30 obr./min.

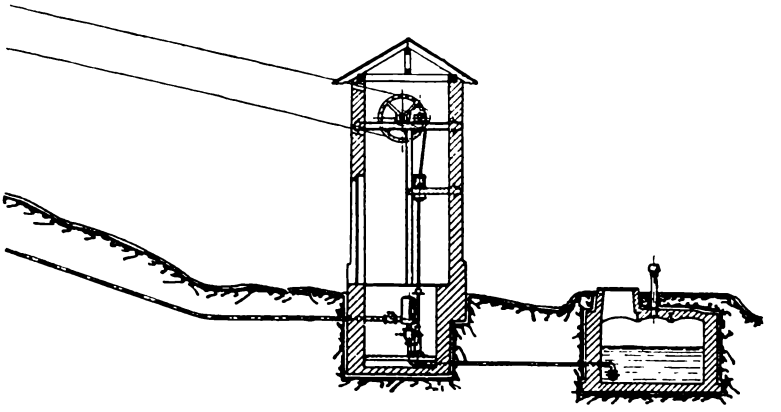
Moc silnika niezbędną do napędu pompy oblicza się w sposób bardzo prosty na podstawie danych, obejmujących zapotrzebowanie wody w ciągu godziny i wysokość pompowania. Jeżeli więc wydajność pomp wynosi Q m³/godz., wysokość pompowania zaś H m, to silnik do wykonania tej pracy winien posiadać moc równą:

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot 1000}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \text{ KM}.$$

We wzorze tym spółczynnik sprawności pompy przyjmujemy zazwyczaj równy $\eta_1 \cong 0{,}8$, zaś spółczynnik sprawności wszystkich przekładni $\eta_2 \cong 0{,}75$.

Jeżeli pompy mają pracować nie całą dobę, lecz np. tylko 16 godzin w ciągu doby, to moc silnika wzrośnie w stosunku $\frac{24}{16}$, czyli

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot 1000}{3600 \cdot 75 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}75} \cdot \frac{24}{16} \text{ KM}.$$

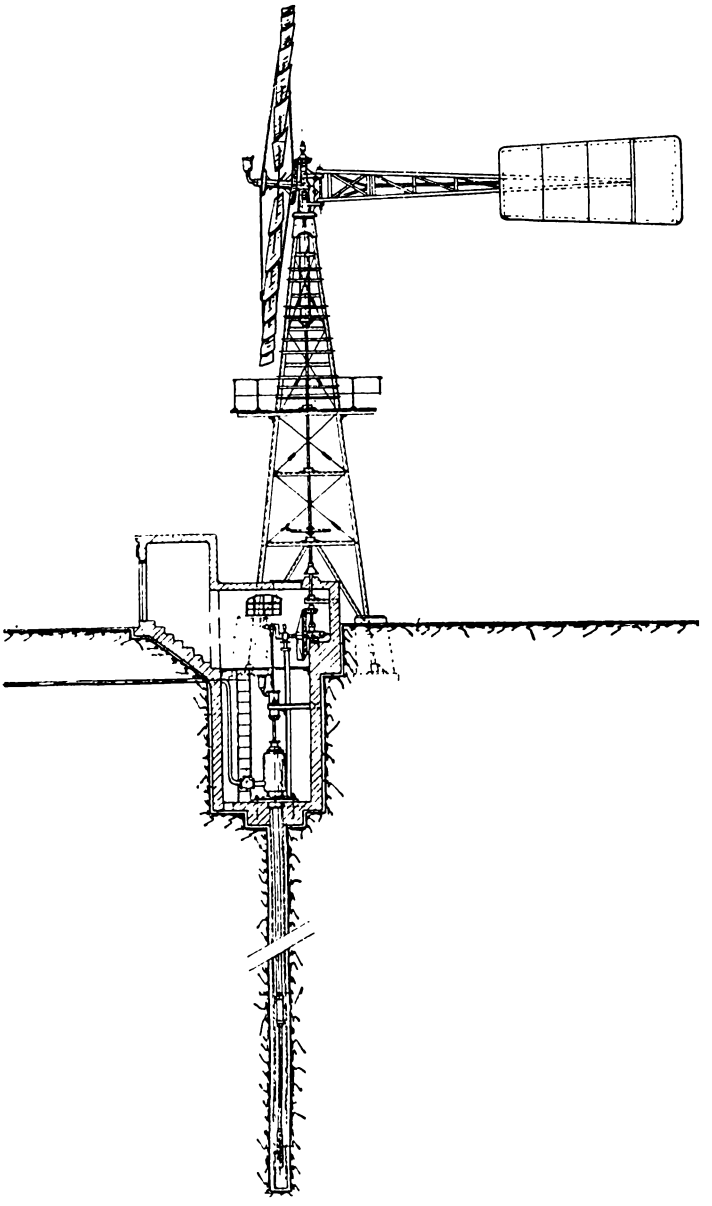


Rys. 99.

W projekcie urządzenia należy zatem przewidzieć silnik o tej właśnie mocy, rozwijanej przezeń przy wietrze o średniej szybkości.

Dla przykładu obliczmy moc silnika do napędu pomp, zasilających wodociąg osady o 2000 mieszkańców, zużywających

w ciągu doby 120 m^3 wody. Całkowita wysokość pompowania wynosi 50 m. Silnik może pracować 12 godzin na dobę. Wobec



Rys. 100.

tego moc rzeczywista silnika, mierzona na wale skrzydłowym, powinna wynosić:

$$N = \frac{120 \cdot 50 \cdot 1000}{12 \cdot 3600 \cdot 75 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}75} \cong 3 \div 3{,}5 \text{ KM}.$$

Niżej podaję nieco danych, dotyczących mocy i wymiarów silników wietrznych i pomp, wyrabianych przez firmę Vereinigte Windturbinenfabrik w Dreźnie (syst. „Herkules") oraz firmę Edmund Kletsch (syst. „Energie").

TABLICA 21.

Moc silników „Herkules".

Średnica wirnika m	Moc silnika na wale skrzydłowym w *KM* przy przybkości wiatru		
	5 m/sek	6 — 7 m/sek	8 m sek
2,5	1/6	2/3	3/4
3	1/4	3/4	1
3,5	1/3	1	1 1/4
4	1/2	1 1/2	2
4,5	3/4	2	3
5	1	2,5	4
5,5	1 1/4	3	5
6	1 1/2	4	6
6,5	1 3/4	4,5	7
7	2	5	8
7,5	2 1/4	5 1/2	9
8	2 1/2	6	10
8,5	2 3/4	6 1/2	11
9	3	7	12
10	4	8	14
11	5	10	15
12	6	14	20
13,5	8	19	28
15	10	25	36

TABLICA 22.

Wymiary turbin wietrznych „Herkules" do pompowania wody przy szybkości wiatru ok. 5 m/sek.

Wydajność pompowania l/godz.	Wysokość pompowania m									
	do 5	10	15	20	30	40	50	60	75	100
	Średnica wirnika wietrznego *D* m									
400 — 500	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3	3	3	3,5	4
600 — 750	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	4	4,5
800 — 1 000	2,5	2,5	3	3	3	3	3,5	4	4,5	5
1 200 — 1 500	3	3	3	3	3,5	4	4	4,5	5	5
1 700 — 2 000	3	3	3	3,5	4	4,5	4,5	5	5	5,5
2 200 — 2 500	3	3	3,5	4	4,5	5	5	5,5	6	6
2 600 — 3 000	3	3	3,5	4	4,5	5	5	5,5	6	6,5
3 500 — 4 000	3	3,5	4	4	5	5	5,5	6	6,5	7,5
4 500 — 5 000	3	3,5	4	4,5	5,5	5,5	6	6,5	7	8
5 500 — 6 000	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7,5	8	9
7 000 — 8 000	3,5	4	5	5	6	6,5	7,5	8	9	10
9 000 — 10 000	3,5	4,5	5	5,5	6,5	7,5	8	9	10	11
11 000 — 12 000	3,5	5	5,5	6	7	8	9	10	11	12
13 000 — 15 000	4	5	6	6,5	7,5	9	10	11	12	13,5
16 000 — 20 000	4,5	5,5	6,5	7	9	10	11	12	13,5	15
21 000 — 25 000	5	6	7	8	10	11	12	13,5	15	15
26 000 — 30 000	5	6,5	7,5	9	11	12	13,5	15	15	—
35 000 — 40 000	5,5	7,5	9	10	12	13,5	15	15	—	—

Należy podkreślić, że przytoczone dane, dotyczące mocy silników, są przesadzone, bowiem według wzoru:

$$N = 0{,}000\,85\, F v^3 \xi$$

podanym liczbom odpowiadają wartości spółczynnika ξ zawarte w granicach od 0,41 do 0,46, podczas gdy według badań wartość tego spółczynnika dla silników wieloskrzydłowych nie przekracza 0,30 ÷ 0,35.

TABLICA 23.

Wymiary turbin wietrznych syst. „Energie", o ruchu korbowym drąga pionowego.

Średnica wirnika D m	Przekładnia	Skok drąga pionowego mm	Liczba skrzydeł	Liczba skoków drąga na minutę przy szybkości wiatru m/sek.				
				2,5	3,5	4,5	5,5	7
3	1:2	140, 160	18	16	21	26	31	40
3,5	1:2	140, 160	18	14	18	22	27	34
4	1:2	140, 160, 200	18	13	16	19	25	30
4,5	1:2	140, 160, 200	18	11	14	18	21	26
5	1:2	140, 160, 200	18	9	12	16	18	24
5,5	1:2	140, 160, 200	18	8	11	14	16	21

TABLICA 24.

Średnice wirników turbin wietrznych syst. „Energie" o ruchu korbowym drąga pionowego dla różnych wydajności pomp.

Wydajność pompowania		Wysokość pompowania m										
		do 10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100
na godz.	na dobę	Średnica wirnika D m										
600	5 000	3	3	3	3	3	3	3,5	3,5	3,5	4	4,5
800	6 000	3	3	3	3	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5
1 000	8 000	3	3	3	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	5
1 200	10 000	3	3	3	3,5	3,5	4	4,5	4,5	4,5	5	5,5
1 500	12 000	3	3	3,5	3,5	4	4,5	4,5	4,5	5	5	5,5
1 800	15 000	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5
2 000	16 000	3	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5	
2 500	20 000	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5		
3 000	25 000	3,5	4	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5	5,5		
3 500	28 000	4	4,5	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5			
4 000	32 000	4	4,5	4,5	5	5	5,5	5,5				
4 500	36 000	4,5	4,5	4 5	5	5 5	5,5					
5 000	40 000	4,5	4,5	5	5	5,5						
6 000	48 000	4,5	5	5	5,5							
7 000	56 000	4,5	5	5,5								
8 000	64 000	5	5,5	5,5								
10 000	80 000	5,5	5,5									
12 000	100 000	5,5										

Turbiny wietrzne o większych średnicach wirników posiadają wał pionowy wirujący

TABLICA 25.

Srednice wirników turbin wietrznych syst. „Energie" z pionowym wałem wirującym.

Wydajność pompowania		Wysokość pompowania m										
		do 10	15	20	25	30	40	50	75	100	125	150
na godz.	na dobę	Średnica wirnika D m										
2 000	16 000	3	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5,5	6	6,5	6,5
2 500	20 000	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5	5,5	6,5	7,5	7,5
3 000	24 000	3,5	4	4,5	4,5	5	5	5,5	6	7,5	8	8,5
4 000	32 000	3,5	4	4,5	5	5	5,5	6	6,5	8,5	9	9,5
5 000	40 000	4	4,5	5	5	5,5	6	6,5	7,5	9,5	9,5	10
6 000	48 000	4,5	5	5	5,5	6	6,5	7	8,5	10	10,5	11,5
8 000	64 000	4,5	5,5	6	6,5	6,5	8	8,5	10	11	12	12,5
10 000	80 000	5	5,5	6,5	7	8	8,5	9,5	10,5	12,5	13,5	15
12 000	100 000	5,5	6	7	7,5	8,5	9,5	10	11	13,5	15	16
15 000	120 000	6	6,5	8	8,5	9,5	10,5	11	12	15	16	—
20 000	160 000	6,5	7,5	9	9,5	10,5	11,5	12	13,5	16	—	—
25 000	200 000	7	7,5	9	10	11	12,5	13,5	15	—	—	—
30 000	240 000	7	8,5	9,5	10,5	11,5	13,5	15	16	—	—	—

TABLICA 26.

Moc silników „Energie" z wałem pionowym wirującym z prędkością n obr./min.

Średnica wirnika D m	Przy prędkości wiatru m/sek.							
	5		6		7		8	
	KM	n	KM	n	KM	n	KM	n
3	0,30	200	0,50	233	0,75	267	1,00	300
3,5	0,40	185	0,75	215	1,00	245	1,25	275
4	0,50	165	1,00	195	1,65	225	2,00	250
4,5	0,75	145	1,25	165	2,00	185	3,00	215
5	1,00	140	1,80	165	2,75	190	4,00	210
5,5	1,25	130	2,50	155	4,00	175	5,00	195
6	1,50	125	2,65	145	4,25	165	6,00	185
6,5	1,75	120	3,00	140	5,00	160	7,00	180
7	2,00	115	3,50	135	5,50	155	8,00	170
7,5	2,25	115	4,00	135	6,50	155	9,50	170
8	2,50	112	4,50	132	7,00	150	11	170
8,5	2,75	110	5,20	130	8,00	145	12	165
9	3,00	105	5,75	125	9,00	140	14	160
9,5	3,75	100	6,50	117	10	135	15	150
10	4,00	90	7,00	105	11	120	16	135
10,5	4,50	80	8,00	93	12	108	18	120
11	5,00	85	8,50	100	13	115	20	130
11,5	5,40	80	9,00	93	14,5	108	22,5	120
12	6,00	80	10	93	16	108	24	120
12,5	6,60	75	11,5	87	18	100	27	110
13,5	7,50	70	13	82	22	94	29	105
15	9,00	74	16	86	25	98	33	110
16	10	70	18	82	28	94	40	105

Również i te dane, dotyczące mocy silników „Energie", są przesadzone, o czem z łatwością można się przekonać, wyliczając wartość spółczynnika ξ. Dla silnika np. o średnicy

wirnika $D = 10$ m, tablica podaje moc 16,5 KM przy szybkości wiatru $v = 8$ m/sek. Dla tych danych spółczynnik ξ wyniósłby

$$\xi = \frac{16{,}5}{0{,}00085 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 8^3} = 0{,}485 .$$

2. **Odwadnianie i nawadnianie gruntów.** Silniki wietrzne nadają się szczególnie często do osuszania terenów błotnistych lub zalanych wodą . W Holandji wiatraki do tego celu stosowane były już od XIV wieku. W XIX stuleciu, wraz z rozwojem silników cieplnych, a następnie maszyn elektrycznych, zastosowanie silników wietrznych do odwadniania uległo znacznemu ograniczeniu. Jednakże w ostatnich latach wiatraki nowoczesne, dzięki małym kosztom ruchu i zbędności stałego w pracy dozoru, zaczęły ponownie współzawodniczyć z pozostałemi silnikami. W samej Holandji jedna tylko firma Vereinigte Windturbinen-Werke ustawila do roku 1914 około 300 turbin wietrznych systemu „Herkules", służących do wypompowywania wody.

Do określenia mocy stacji pomp oraz silników wietrznych konieczna jest znajomość danych, dotyczących ilości wypompowywanej wody i wysokości jej podnoszenia. W obliczeniach najlepiej jest oprzeć się na wynikach pomiarów bezpośrednich i obserwacyj miejscowych. W braku jednak tych ostatnich można przy planowaniu odwadniania nizin polskich oprzeć się na danych praktycznych, osiągniętych w Niemczech. Mianowicie, można przyjąć następujące ilości wody, które należy wypompować: przy osuszaniu a) terenów mokrych nie posiadających źródeł — 3 m³/godz. z 1 ha, b) terenów mokrych, obfitujących w źródła — 4 m³/godz., ha i c) pozostałych terenów, z których woda spływa do miejsc osuszanych, — 1 m³/godz.ha. Liczby te uwzględniają już okres ruchu silnika tylko $8 \div 10$ godzin w ciągu doby, przytem przyjęto szybkość wiatru równą 5 m/sek. Przy projektowaniu urządzeń do nawadniania łąk przez zalewanie ich można przyjmować zapotrzebowanie wody od 1 do 2 l/sek.ha nieprzerwanego strumienia w ciągu 90 dni, do nawadniania zaś łąk torfiastych zapomocą kanałów — 0,20 do 0,50 l/sek.ha.

Wysokość podnoszenia wody przy nawadnianiu i odwadnianiu gruntów zmienia się zazwyczaj w zależności od stanu wody w kanałach dopływowych i odpływowych. Największą

i najmniejszą wysokość podnoszenia wody zapomocą pomp lub innych urządzeń należy zatem określić na podstawie spostrzeżeń nad wahaniem się poziomu wód. Zazwyczaj wysokość pompowania nie bywa duża i mieści się w granicach od 0,50 do 4,5 m, w poszczególnych przypadkach może jednak czasem osiągnąć liczby znacznie większe.

Sposób obliczania mocy silnika w urządzeniu do odwadniania najlepiej wyjaśni przykład. Przypuśćmy, mianowicie, że należy osuszyć teren bagnisty o powierzchni 500 ha; cały obszar, z którego woda spływa do bagien, wynosi 12 km^2. Wysokość podnoszenia wody dochodzi do 1,5 m. Obecności źródeł na osuszanym terenie nie przewidujemy.

Wydajność pomp lub czerpadeł winna zatem wynosić:

$$Q = 3 \,.\, 500 + 1 \,.\, (1200 - 500) = 1500 + 700 = 2200 \text{ m}^3/\text{godz.}$$

Do podniesienia tej ilości wody na wysokość 1,5 m przy sprawności urządzenia $\eta_1 = 0{,}90$ (np. ślimak Archimedesa firmy Koester'a) i sprawności przekładni $\eta_2 = 0{,}75$ potrzebny jest silnik o mocy:

$$N = \frac{2200 \,.\, 1000 \,.\, 1{,}5}{3600 \,.\, 75 \,.\, 0{,}9 \,.\, 0{,}75} = 18 \text{ KM}.$$

Mocy tej, według danych katalogowych np. dla silników „Energie" (tabl. 26), może dostarczyć przy prędkości wiatru 7 m/sek silnik o średnicy wirnika 12,5 m; przy wietrze słabszym, np. 6 m/sek, wirnik winienby posiadać średnicę 16 m. Jeżeli jednak obliczyć wymiary, przyjmując $\xi = 0{,}33$, to średnice wirnika wypadną odpowiednio 15,5 i 19,5 m[1]).

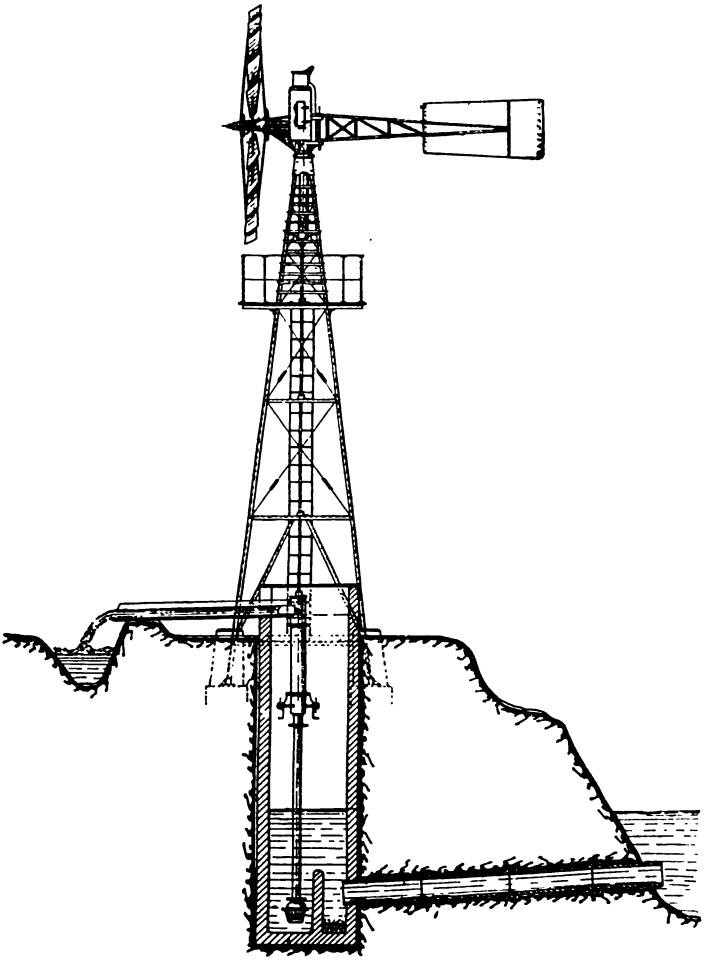
Niżej podaję opisy typowych urządzeń do osuszania i nawadniania gruntów, zaopatrzonych w napęd wiatrakowy.

A. Do wypompowywania niedużych ilości wody (do 30 m^3/godz.) przy niewielkich wysokościach podnoszenia (do 6 m) szczególnie nadają się silniki wietrzne wieloskrzydłowe z zamianą ruchu obrotowego na ruch posuwisty tłoków pomp bezpośrednio na wale skrzydłowym zapomocą wykorbienia tego ostatniego. Budowę takiego urządzenia wyjaśnia dostatecznie rys. 101.

B. W przypadkach, gdy wydajność urządzenia musi być znacznie większa (do 1000 m^3/godz. i więcej), a wysokość podnoszenia stosunkowo nieznaczna (od 0,5 do 3 m, najwyżej

[1]) Patrz dalej: „Nomogram do wyznaczania mocy wiatraków".

4,5 m), woda zaś jest bardzo mętna, szczególnie dobrze pracują t. zw. podnośniki wody, czyli czerpadła, wykonane w postaci otwartych lub zamkniętych ślimaków Archimedesa. Czerpadła te odznaczają się prostotą budowy i trwałością oraz bardzo wysoką sprawnością, dochodzącą w najnowszych ślimakach Köster'a do 90%. Budowę tych ostatnich wyjaśniają rysunki



Rys. 101.

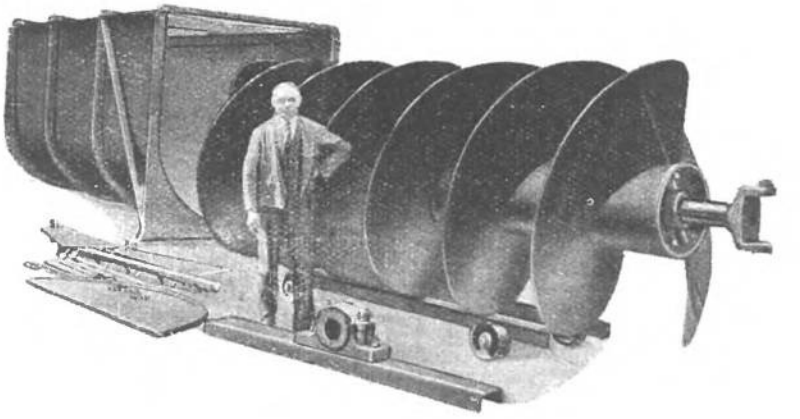
102 i 103. Sam ślimak osadzony jest na wale żelaznym, połączonym przegubowo z wałem pędzącym, i umieszczony w żelaznem korycie. To ostatnie jednym końcem wspiera się na betonowym fundamencie, drugim zaś zawieszone jest na wciągarce, służącej do regulacji zanurzenia ślimaka w wodzie zależnie od poziomu jej w kanale. Kąt pochylenia osi ślimaka

względem poziomu waha się w granicach od 10^0 do 40^0. Najkorzystniejsze wartości tego kąta wynoszą $15^0 \div 20^0$. Dolna część ślimaka nie powinna jednak być całkowicie zanurzona w wodzie.

Wydajność ślimaków Archimedesa można obliczyć teoretycznie ze wzoru:

$$Q = \eta \cdot \frac{n z}{60} \cdot q \ \mathrm{m^3/sek},$$

przytem we wzorze tym η jest to spółczynnik sprawności ślimaka, n — liczba obrotów ślimaka na minutę, z — liczba zwojów ślimaka, q — objętość wody w m^3, zawarta pomiędzy dwo-



Rys. 102.

ma zwojami. Spółczynnik sprawności ślimaków otwartych wynosi $0{,}60 \div 0{,}70$, zamkniętych zaś — $0{,}70 \div 0{,}75$. Ślimaki systemu Köster'a posiadają wysoką sprawność: $\eta = 0{,}90$. Liczba obrotów ślimaka waha się zazwyczaj w granicach $n = \frac{30}{d}$ do $n = \frac{50}{d}$, gdzie d jest to średnica ślimaka, wyrażona w metrach.

Odbiorcy polegają zazwyczaj na danych katalogowych, które też dla przykładu przytaczam w zamieszczonych niżej tablicach.

W przypadkach, gdy wymagana jest jeszcze większa wydajność urządzenia, ustawia się obok siebie dwa, a czasem

TABLI

Wymiary i wydajności ślimaków firmy Kletsch w Dreźnie

Srednica ślimaka . . . mm	200	250	300	350	400	450	500	550
Skok ślimaka . . . . . mm	200	250	300	350	400	450	500	550
Liczba obrotów ślimaka $n_{norm.}$	140	112	90	80	70	62	55	50
Liczba obrotów ślimaka $n_{max.}$	200	165	140	120	100	95	85	75
Wydajność ślimaka Q m³/godz. norm.	17	28	45	60	90	120	150	180
Wydajność ślimaka Q m³/godz. max.	25	42	67	90	135	180	225	270
	a) Osusza							
Można osuszyć obszar o powierzchni ha — Pierwszy szereg poziomy dotyczy spły								
Drugi „ „ „ „								
Trzeci „ „ „ „								
	6	9	15	20	30	40	50	60
	5	8	13	17	26	35	43	50
	4	7	11	15	22	30	37	45
Można nawodnić obszar ha	b) Nawad							
przy gruntach lekkich	7	10	18	24	36	48	60	70
„ „ średnich . .	8	15	22	30	45	60	80	90
„ „ ciężkich . .	10	20	30	40	60	80	100	120
Przy wysokości podnoszenia wody w m	Odpowiednie średnice wirników							
0,50	2	2	2	2½	3	4	4	4
0,60	2	2	2½	3	3	4	4	4½
0,70	2	2	2½	3	3½	4	4½	4½
0,80	2	2	3	3	4	4½	4½	5
0,90	2	2	3	3	4	4½	4½	5
1,00	2	2	3	3½	4	4½	5	5
1,10	2	2½	3	4	4½	4½	5	5½
1,25	2	2½	3½	4	4½	5	5½	5½
1,50	2	3	3½	4	4½	5½	5½	6
1,75	2½	3	4	4½	5	5½	6	6½
2,00	2½	3	4	4½	5	6	6½	7
2,25	3	3½	4½	4½	5½	6	7	7½
2,50	3	3½	4½	5	6	6½	7½	8
2,75	3	4	4½	5	6	7	8	8½
3,00	3	4	4½	5	6	7	8	9

C A 27.

oraz wymiary odpowiednich silników wietrznych.

600	650	700	750	800	850	900	1000	1250	1500	1600
600	650	700	750	800	850	900	1000	1000	1000	1000
46	43	40	37	35	33	31	28	24	20	18
70	65	60	55	53	50	46	42	36	30	27
210	240	270	300	330	360	420	460	620	735	760
315	360	400	450	495	540	600	680	930	1100	1150

nie gruntów

wu wody w ilości 0,35 l/sek.ha, co odpow. wydajn. urządz. 3 m³/h.ha

„ „ 0,40 „ „ „ „ „ „ 3,5 „ „

„ „ 0,45 „ „ „ „ „ „ 4 „ „

70	80	90	100	120	120	140	150	200	245	255
60	70	80	85	95	100	120	130	165	215	220
52	60	65	75	82	90	105	115	130	185	190

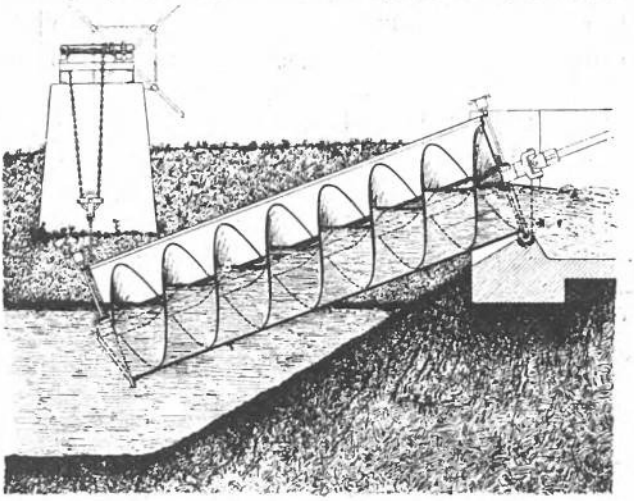
nianie gruntów

80	95	110	120	130	140	170	180	250	300	350
100	120	130	150	160	180	210	230	310	360	380
140	160	180	200	220	240	280	300	400	500	550

turbin wietrznych przy prędkości wiatru około 7 m/sek. *D* m

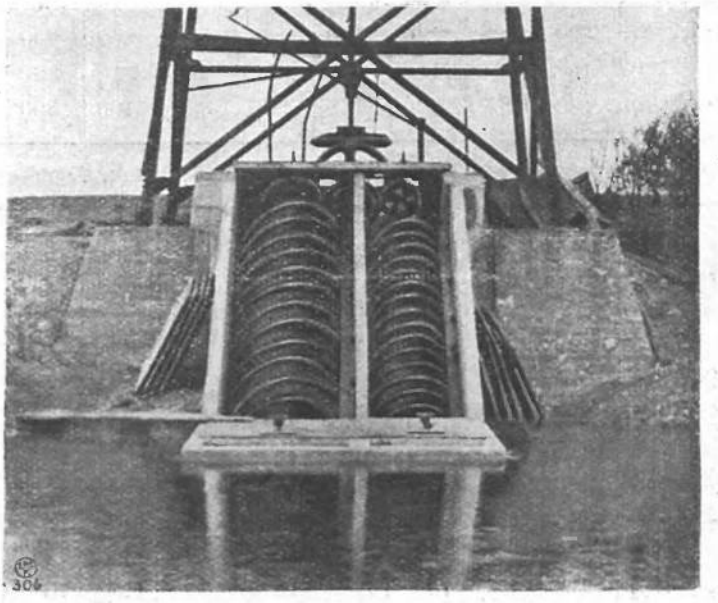
4 ½	4 ½	5	5	5 ½	5 ½	5 ½	6	6 ½	7	7 ½
4 ½	5	5	5 ½	5 ½	5 ½	6	6 ½	7	8	8
5	5	5 ½	5 ½	6	6	6 ½	6 ½	8	8 ½	9
5	5 ½	5 ½	6	6	6 ½	6 ½	7	8 ½	9 ½	9 ½
5 ½	5 ½	6	6	6 ½	6 ½	7	7 ½	9	10	10
5 ½	6	6	6 ½	7	7	7 ½	8 ½	9 ½	10	10 ½
6	6	6 ½	7	7 ½	7 ½	8 ½	9	10	10 ½	11
6	6 ½	7	7 ½	7 ½	8 ½	9	9 ½	10 ½	11	11 ½
6 ½	7	7 ½	8 ½	8 ½	9	9 ½	10	11	12	12 ½
7	7 ½	8 ½	9	9 ½	9 ½	10	10 ½	11 ½	13 ½	13 ½
7 ½	8 ½	9	9 ½	10	10	10 ½	11	12 ½	15	15
8 ½	9	9 ½	10	10	10 ½	11	11 ½	13 ½	15	16
9	9 ½	10	10 ½	10 ½	11	11 ½	12 ½	15	16	16
9 ½	10	10	10 ½	11	11 ½	12 ½	13 ½	15	—	—
10	10	10 ½	11	11 ½	12	13 ½	15	16	—	—

nawet trzy ślimaki, napędzane jednym silnikiem wietrznym. Urządzenie o dwu ślimakach przedstawione jest na rys. 104.



Rys. 103.

Wydajności i wymiary urządzeń wietrznych o kilku czerpadłach ślimakowych podają tablice 28 i 29.



Rys. 104.

W tabl. 30 zestawione są wymiary ślimaków Archimedesa odpowiadających im turbin wietrznych typu „Energie".

TABLICA 28.

Urządzenia do osuszania i nawadniania gruntów z dwoma ślimakami Archimedesa.

Średnice ślimaków . . . mm	900	1000	1250	1500	1600
Skok ślimaków . . . . . mm	900	1000	1000	1000	1000
Liczba obrotów *n* norm.	31	28	24	20	18
„ „ *n* max.	46	42	36	30	27
Wydajność urządzenia *Q* m³/godz. . . . norm.	840	920	1240	1470	1520
„ max.	1200	1360	1860	2200	2300
	a) Osuszanie gruntów: pierwszy szereg poziomy dotyczy wydajności 3 m³/godz.ha; drugi szereg poziomy dotyczy wydajności 3,5 m³/godz.ha; trzeci szereg poziomy dotyczy wydajności 4,0 m³/godz.ha				
Można osuszyć obszar o powierzchni ha	280	300	400	490	510
	240	260	330	430	440
	210	230	260	270	380
Można nawodnić obszar ha	b) Nawadnianie gruntów:				
przy gruntach lekkich . . .	335	370	500	600	610
„ „ średnich	420	460	620	735	760
„ „ ciężkich	560	610	820	980	1000
Przy wysokości podnoszenia w m	Odpowiednie średnice wirników turbin wietrznych *D* m przy prędkości wiatru około 7 m/sek				
0,50	8 ½	9 ½	10	10 ½	11
0,60	9 ½	10	10 ½	11 ½	11 ½
0,70	10	10 ½	11 ½	12	12 ½
0,80	10 ½	11	12	13 ½	13 ½
0,90	11	11 ½	12 ½	13 ½	13 ½
1,00	11 ½	12	13 ½	15	15
1,10	12	12 ½	13 ½	15	16
1,25	12 ½	13 ½	15	16	16
1,50	13 ½	15	16	—	—
1,75	15	15	16	—	—
2,00	15	16	—	—	—
2,25	16	—	—	—	—

TABLICA 29.

Urządzenia do osuszania i nawadniania gruntów z trzema ślimakami Archimedesa.

Średnice ślimaków . . . mm	1250	1500	1600
Skok ślimaków . . . . . mm	1000	1000	1000
Liczba obrotów . . . n norm.	24	20	18
„ „ n max.	36	30	27
Wydajność urządzenia Q m³/g.			
norm.	1860	2200	2280
max.	2800	3300	3450
Można osuszyć obszar o powierzchni ha	a) Osuszanie gruntów: pierwszy szereg poziomy dotyczy wydajności 3 m³/godz. ha drugi szereg poziomy dotyczy wydajności 3,5 m³/godz. ha trzeci szereg poziomy dotyczy wydajności 4,0 m³/godz. ha		
	600	730	760
	530	630	650
	465	550	570
Można nawodnić obszar ha	b) Nawadnianie gruntów		
przy gruntach lekkich . . .	745	880	900
„ „ średnich . . .	930	1100	1140
„ „ ciężkich . .	1200	1450	1500
Przy wysokości podnoszenia w m	Odpowiednie średnice wirników turbin wietrznych D m przy prędkości wiatru 7 m/sek.		
0,50	12	12 ½	13 ½
0,60	12 ½	13 ½	13 ½
0,70	13 ½	15	15
0,80	15	16	16
0,90	16	- -	- -
1,00	16	---	---
1,10	należy budować dwie albo trzy turbiny wietrzne		
1,25			
1,50			
1,75			
2,00			
2,25			
2,50			
2,75			
3,00			

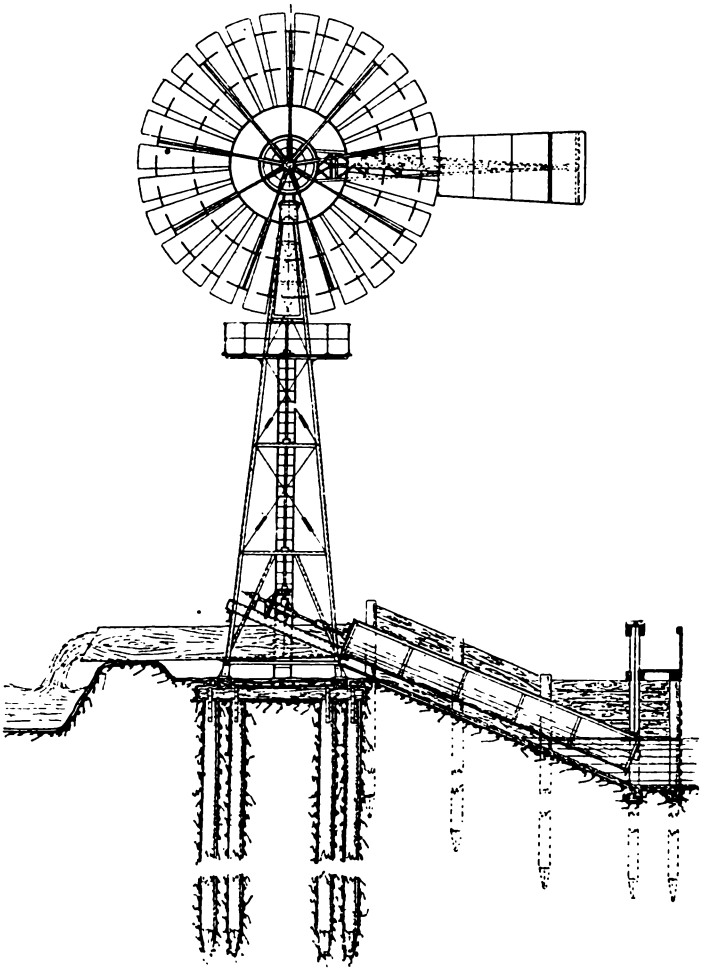
TABLICA 30.

Wymiary ślimaków Archimedesa i odpowiadających im turbin wietrznych „Energie" przy prędkości wiatru 6 m/sek.
L — długość ślimaka w m *D* — średnica wirnika w m.

Średnica ślimaka w m/m	Liczba obrotów na min. n	Wydajność ślimaka m³/godz.	Przy wysokości podnoszenia wody w metrach																			
			0,80		1,00		1,20		1,50		1,70		2,00		2,20		2,50		2,70		3,00	
			L	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*	*L*	*D*
300	90 — 140	45 do 70	3,0	3	3,4	3 ½	3,8	3 ½	4,5	4	5,0	4	5,8	4 ½	6,4	4 ½	7,2	5	7,6	5	8,6	5 ½
350	80 — 120	60— 90	3,0	3 ½	3,5	4	4,0	4	4,8	4 ½	5,4	4 ½	6,2	5	6,8	5	7,6	5	8,0	5 ½	9,0	6
400	70 — 105	90— 135	3,0	4	3,6	4 ½	4,2	4 ½	5,0	5	5,5	5 ½	6,3	6	6,8	6	7,7	6 ½	8,2	6 ½	9,1	7
450	62 — 95	120- 180	3,2	4 ½	3,7	5	4,4	5	5,1	5 ½	5,75	6	6,5	6 ½	6,9	7	7,8	7 ½	8,4	8	9,2	8 ½
500	55 — 85	150— 225	3,4	5	3,8	5 ½	4,5	6	5,3	6 ½	5,8	7	6,7	7 ½	7,0	8	8,0	8 ½	8,5	9	9 3	9 ½
550	50 — 75	180— 270	3,5	5 ½	3,9	6	4,5	6 ½	5,4	7	5,9	7 ½	6,75	8 ½	7,1	8 ½	8,1	9	8,6	9 ½	9,3	9 ½
600	46 — 70	210— 315	3,6	6	4,0	6 ½	4,5	6 ½	5,5	7	6,0	8	6,8	8 ½	7,3	9	8,2	9 ½	8,7	10	9,5	10 ½
650	43 — 65	240— 360	3,7	6 ½	4,2	7	4,6	7	5,6	8	6,1	9	6,9	9 ½	7,5	10	8,3	10 ½	8,8	11	9,5	11 ½
700	40 — 60	270— 400	3,8	7	4,4	7	4,8	7 ½	5,7	8 ½	6,3	9 ½	7,0	10	7,6	10 ½	8,4	11	9,0	11 ½	9,8	12
750	37 — 55	300— 450	3,9	7	4,5	7 ½	5,0	8	5,8	9	6,4	10	7,1	10 ½	7,7	10 ½	8,5	11 ½	9,1	12	9,9	12 ½
800	35 — 53	330— 500	4,0	7 ½	4,6	8	5,2	8 ½	6,0	9 ½	6,5	10 ½	7,3	10 ½	7,8	11 ½	8,7	12	9,2	12 ½	10,0	12 ½
850	33 — 50	360— 540	4,2	8	4,7	8 ½	5,3	9	6,1	9 ½	6,6	10 ½	7,5	11	7,9	11 ½	8,75	12	9,3	12 ½	10,1	12 ½
900	31 — 46	420— 600	4,3	8 ½	4,8	9	5,4	9 ½	6,3	10	6,8	11	7,6	11	8,0	12	8,8	12 ½	9,4	—	10,2	—
1000	28 — 42	480— 720	4,6	9 ½	5,0	10	5,7	10	6,5	11 ½	7,0	12 ½	7,8	12 ½	8,4	—	9,2	—	9,7	—	10,5	—
1100	25 — 38	600— 900	4,8	10	5,4	10 ½	6,0	11 ½	6,7	12	7,25	12 ½	8,0	12 ½	8,6	—	9,5	—	10,0	—	10,75	—
1200	23 — 35	720—1080	5,0	10 ½	5,6	11 ½	6,2	12 ½	7,0	12 ½	7,5	—	8,3	—	8,8	—	9,7	—	10,2	—	11,0	—
1400	20 — 30	1000—1500	5,5	11 ½	6,0	12 ½	6,6	—	7,4	—	8,0	—	8,8	—	9,3	—	10,0	—	10,5	—	11,5	—
1600	18 — 27	1200—1800	6,0	12 ½	6,5	12 ½	7,0	—	7,7	—	8,2	—	9,0	—	9,6	—	10,4	—	11,0	—	1,8	—

Schemat całego urządzenia wiatrakowego ze ślimakiem Archimedesa przedstawiony jest na rys. 105 i 106.

Urządzenie uwidocznione na rys. 105 zbudowane jest na gruncie słabym, dlatego też wieża silnika ustawiona jest na palach i ruszcie z bali. Ślimak umieszczony jest w kanale z desek, przytem dolny koniec jego zawieszony jest na belce po-



Rys. 105.

przecznej drewnianego mostka, umożliwiającego dostęp do regulacji kąta pochylenia ślimaka względem poziomu. Ruch wału pionowego przenosi na wał ślimaka stożkowa przekładnia zębata.

Na drugim rysunku podany jest przekrój ślimaka i widok z boku urządzenia wiatrakowego, zbudowanego na gruncie moc-

nym, pozwalającym na wykonanie fundamentów betonowych.

Wymiary i wydajności ślimaków syst. Köster'a podaje tabl. 31.

TABLICA 31.

Wymiary i wydajność ślimaków Köstera.

Średnica ślimaka, cm		35	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
Największa liczba obrotów na minutę $n_{max.}$		200	180	150	125	95	80	67	57	50	44	40
Wydajność ślimaka l/sek. przy pochyleniu osi pod kątem	15°	66	88	144	208	378	615	890	1200	1580	2000	2460
	20°	56	75	122	176	320	520	750	1030	1330	1700	2080
	25°	46	61	100	144	262	425	615	830	1090	1380	1700
	30°	36	48	78	112	204	330	480	650	850	1080	1320

Do zorjentowania się w przybliżeniu w wymiarach wirników silników wietrznych wieloskrzydłowych, stosowanych do napędu ślimaków, może posłużyć zestawienie zawarte w tablicy 32.

TABLICA 32.

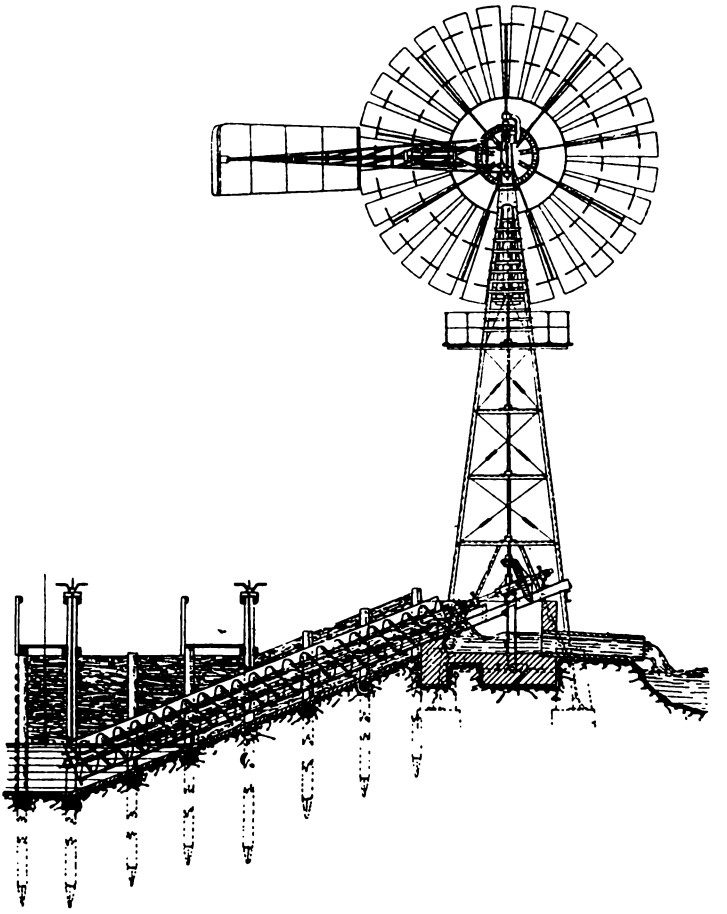
Średnica wirnika D m turbiny wietrznej		5,5	6,5	7,5	8,5	10	12	15
Iloczyn	5 m/sek	226	324	420	535	750	1080	1700
$Q \cdot H \frac{m^3.m}{godz.}$	6 „	390	560	720	930	1300	1880	3000
przy szybkości	7 „	620	890	1160	1480	2000	3000	4700
wiatru równej:	8 „	930	1330	1720	2200	3100	4400	7000
Możność osuszania obszaru w ha przy wysokości pompowania równej	1,5 m	150	210	280	360	500	720	1100
	2 „	110	160	210	270	375	540	820
	2,5 „	90	125	160	210	300	430	660
	3 „	75	100	140	180	250	360	550

C. Do przepompowywania wielkich ilości wody na duże wysokości nie nadają się ani pompy tłokowe, ani czerpadła ślimakowe. W takich przypadkach należy stosować pompy odśrodkowe lub śmigłowe. Pierwsze wymagają niezbyt dużych

wysokości ssania, nie przekraczających 5 m, przyczem wysokość tłoczenia może wynosić do 30 m, a nawet więcej.

Sprawność pomp odśrodkowych waha się w granicach od 30% do 75%, zależnie od wielkości i budowy pompy, przytem małe pompy mają zazwyczaj sprawność niższą.

Moc silnika do napędu pompy odśrodkowej oblicza się na podstawie następującej zależności:



Rys. 106.

$$N = n \frac{Q \cdot 1000 \cdot H'}{3600 \cdot 75} \text{ KM},$$

przytem n jest to spółczynnik, którego wartość waha się w granicach od 1,2 do 3,0, Q — wydajność pompy w metrach na godzinę, $H' = H + H_s$ — rzeczywista wysokość pompowania, odczytywana na manometrze, a równa sumie całkowitej

geometrycznej wysokości pompowania H, t. j. różnicy poziomów wody w dolnym i górnym zbiorniku, i wysokości H_s, odpowiadającej stratom ciśnienia w przewodach.

Pompy odśrodkowe budowane są zarówno z osią obrotu pionową, jak i poziomą.

Tabl. 33 [1]) podaje liczby orjentacyjne, dotyczące wymiarów pomp odśrodkowych oraz mocy silników wietrznych do ich napędu.

TABLICA 33.

Średnica przewodu, mm		40	50	60	80	100	125
Wydajność l/min . .		160	250	360	600	1100	1660
Wydajność m³/godz. . .		9,6	15	21,6	36	66	99,6
Liczba obrotów na minutę przy całkowitej wysokości pompowania wody równej m:	3	1600	1500	1250	1100	1000	900
	6	1800	1750	1450	1250	1150	1100
	9	2000	1900	1680	1300	1250	1200
	12	2400	2300	1900	1450	1400	1350
	15	2600	2500	2100	1600	1525	1500
Moc silnika wietrznego w KM do pompowania wody na wysokość równą m:	3	0,50	0,60	0,90	1,75	3,00	3,75
	6	0,65	1,10	1,50	2,50	4,25	5,00
	9	0,85	1,33	1,80	3,50	5,50	7,00
	12	1,00	1,60	2,20	4,50	7,25	10,00
	15	1,50	2,00	3,00	6,00	9,00	12,00

Jako przykład urządzenia wiatrakowego z pompą odśrodkową, może służyć urządzenie przedstawione na rys. 107.

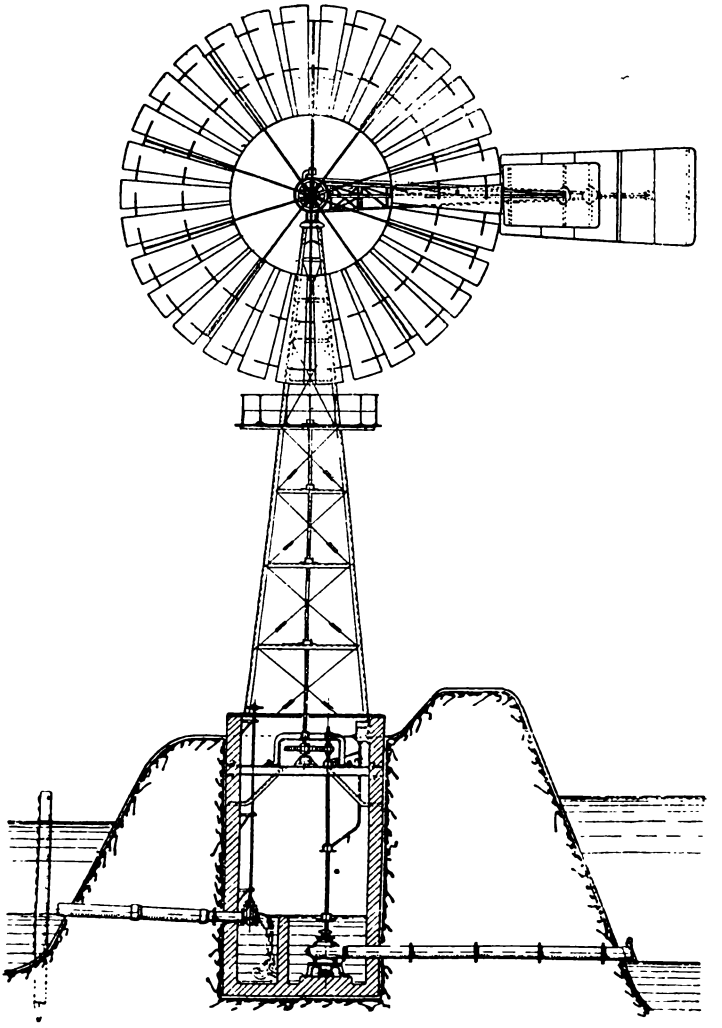
W urządzeniu tem pompa posiada oś obrotu pionową, otrzymującą ruch od wału głównego wiatraka za pośrednictwem przekładni zębatych kół czołowych. Woda pod własnem ciśnieniem dopływa przez rurę do studni, skąd zostaje przepompowywana do zbiornika zalewanego. Przewód tłoczny zaopatrzony jest w klapę zwrotną, nie pozwalającą na przepływ wody w kierunku odwrotnym, t. j. ze zbiornika do studni, w czasie postoju pompy. Dzięki zanurzeniu pompy w głębokiej studni urządzenie to nadaje się również do pracy w zimie.

W ostatnich czasach zaczęto stosować specjalne pompy o osi pionowej, podobne do turbin wodnych, nie posiadające przewodów ssących ani tłocznych, a umieszczone nieco poniżej dolnego poziomu wody w specjalnej studni. Przy obrocie wir-

[1]) Friedrich. Kulturtechnischer Wasserbau t. I., r. 1923, str. 340.

nika, łopatki tego ostatniego chwytają wodę i podają ją na pewną wysokość, nie przekraczającą zazwyczaj 3 m.

Zaletą tych pomp w porównaniu ze zwykłemi pompami odśrodkowemi jest brak wszelkich zaworów, przewodów ssących i tłocznych oraz łatwość uruchamiania bez żadnych czynności przygotowawczych. Wydajność ich dochodzi do 5 m^3/sek.

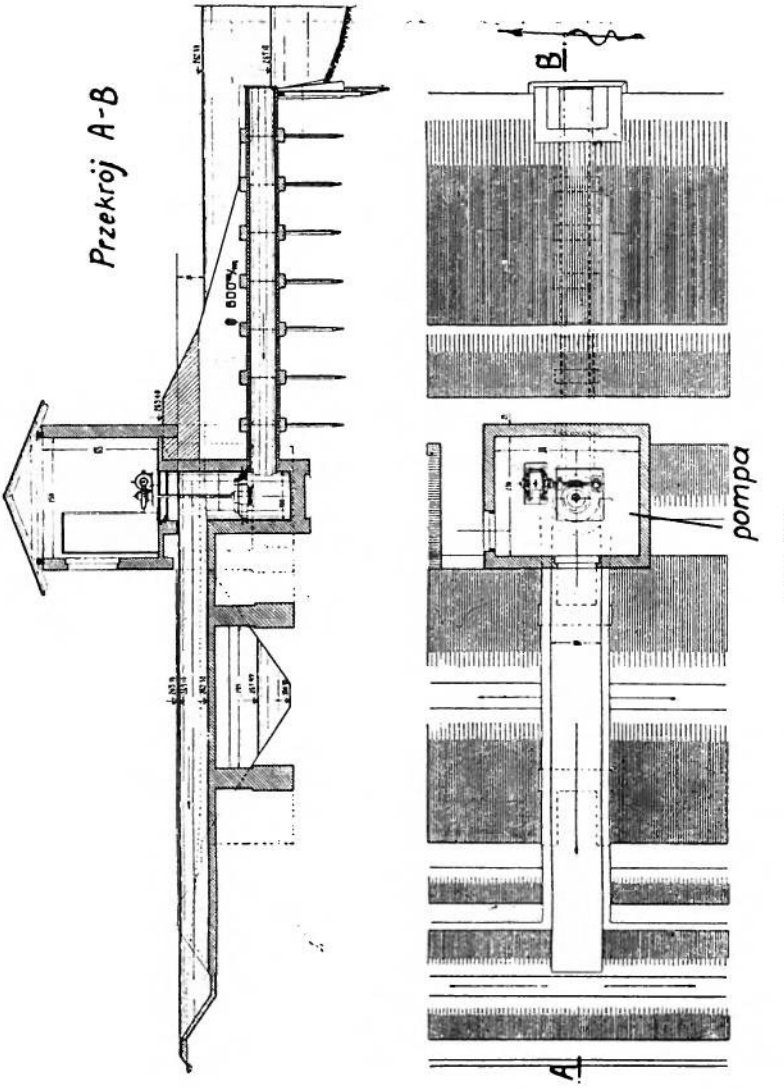


Rys. 107.

Jako przykład takiego urządzenia, może służyć urządzenie przedstawione na rys. 108.

Z pomp najnowszych konstrukcyj na szczególną uwagę zasługuje odśrodkowa pompa śmigłowa Köstera, uwidoczniona

na rys. 109. Pompa ta posiada dużą wydajność, lecz może pracować tylko przy niedużej wysokości pompowania. Wirnik, wykonany w kształcie śmigła o kilku łopatkach (rys. 110 a, b), umieszczony jest w odpowiedniej rurze w sposób wskazany na rys. 111.



Rys. 108.

Wirnik śmigłowy zanurzony jest w wodzie poniżej jej poziomu, dlatego też pompy te nie posiadają właściwych rur ssących. Dzięki korzystnemu kształtowi przewodu o niedużem wygięciu, czyli racjonalnemu prowadzeniu wody, pompy śmigłowe posiadają wysoką sprawność. Zaletą ich jest również

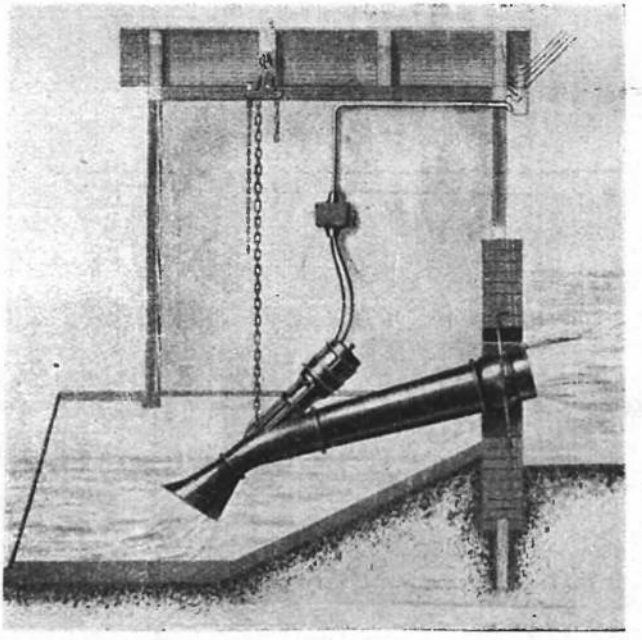
łatwość oględzin i napraw wirnika, który wraz z rurą można bez trudu wyciągnąć z wody.

W tabl. 34 zestawione są moce silników wietrznych do napędu pomp śmigłowych dla różnych wysokości pompowania i różnej wydajności.

TABLICA 34

Wydajność pompy		Wysokość podnoszenia wody H m				
		1	1,5	2	2,5	3
l/sek	m³/godz.	Moc silnika KM				
24	86	0,75	1,00	1,30	1,55	1,85
55	198	1,50	2,20	2,80	3,30	4,00
165	594	4,00	6,00	7,70	9,00	11,00
450	1620	10,00	16,00	20,00	24,00	29,00
1000	3600	22,00	33,00	42,00	50,00	60,00

Pompy śmigłowe są szczególnie wygodne w użyciu przy napędzie elektrycznym, t. j. w układzie wiatrak — prądnica —

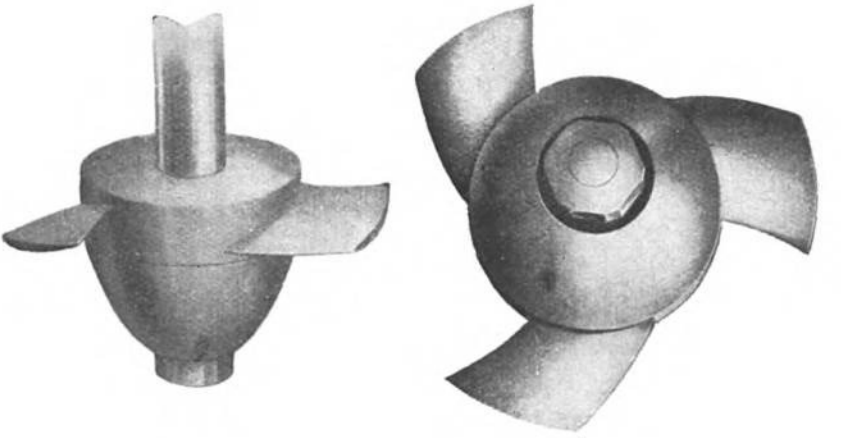


Rys. 109.

silnik elektryczny — pompa, przy bezpośredniem sprzężeniu pompy z silnikiem.

3. **Zastosowanie wiatraków do zalewania stawów rybnych.** Silniki wietrzne mogą znaleźć szerokie zastosowanie w gospo-

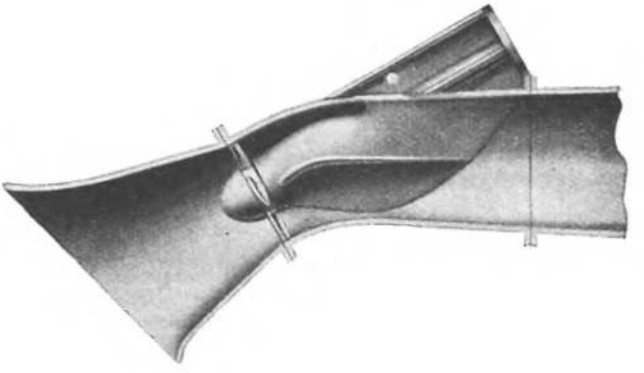
darstwach prowadzących hodowlę ryb, mianowicie do zalewania stawów. Nieregularność pracy wiatraka nie posiada w tym przypadku dużego znaczenia, zwłaszcza gdy możliwe jest zbudowanie zbiornika wyrównawczego w postaci stawu zapaso-



a b

Rys. 110.

wego, którego zadaniem jest wyrównywanie nawodnienia stawów pozostałych. Wobec tego, że zbiornik wyrównawczy nie wymaga stałego napełniania, zmniejszona wydajność urządzenia wiatrakowego, a nawet zupełny jego postój w okresach ciszy, nie zakłócają biegu gospodarki stawami.

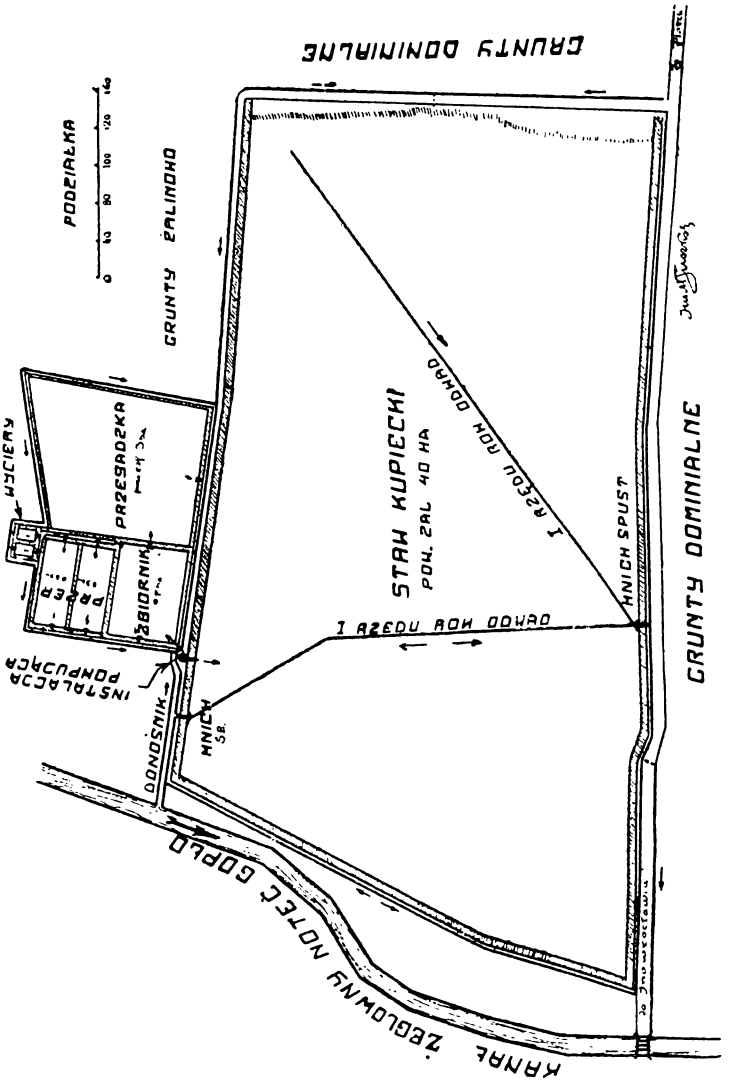


Rys. 111.

Ciekawym przykładem zasilania wodą stawów rybnych zapomocą urządzenia wiatrakowego jest urządzenie takie w gospodarstwie rybnem w Piotrkowicach (wojew. Pomorskie), założone na powierzchni 60 ha nieużytków w 1927 r.

Rozplanowanie stawów i położenie stacji pomp w wymienionem gospodarstwie przedstawione jest na rys. 112[1]).

Obszar 60 ha, zajęty pod stawy, nie posiada własnego zbiornika, któryby zapewniał mu dopływ wody w ilości potrzebnej do zalewania stawów. Stąd też wynikła konieczność

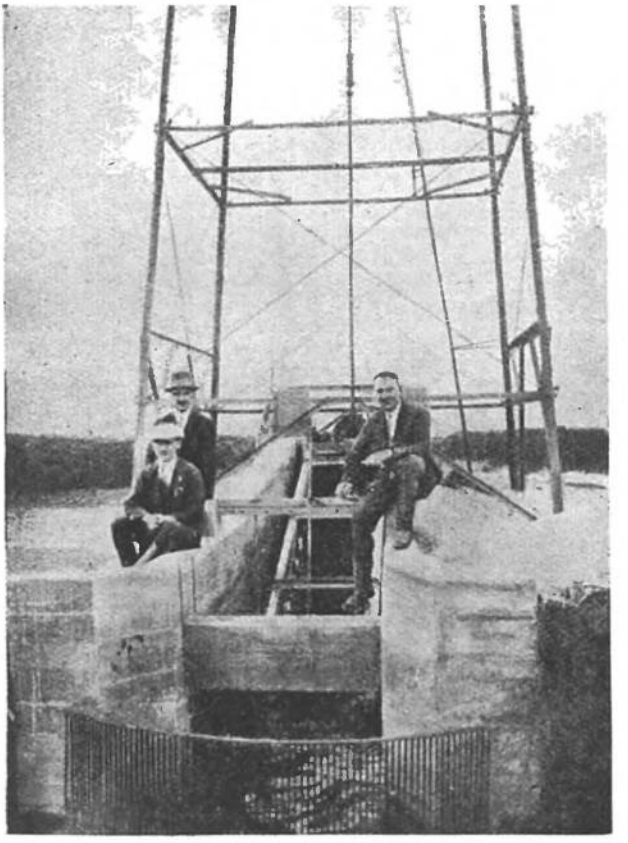


Rys. 112.

zasilania stawów wodą z kanału żeglugowego Noteć — Gopło zapomocą pomp. W czasie badań zagadnienia przydatności i rentowności różnych silników, w celu dokonania wyboru najodpowiedniejszego z nich, okazało się, że w miejscowości tej

[1]) Inż. Tuszko. Gospodarstwo stawowe w Piotrkowicach. Warszawa 1929, str. 12.

panują w ciągu 7610 godzin rocznie wiatry o prędkości przekraczającej 3 m/sek, najdłuższe zaś okresy ciszy mogą wynosić 70 godzin. Podobne warunki meteorologiczne nie są gorsze, aniżeli np. w Danji, gdzie, jak wiadomo, wykorzystanie energji wiatru jest bardzo rozpowszechnione. Dlatego też administracja majątku zdecydowała się na ustawienie urządzenia wiatrakowego z czerpadłami ślimakowemi. Do napędu tych ostatnich zainstalowano turbinę typu amerykańskiego o średnicy wirnika 9 m. Silnik ten przy szybkości wiatru 5 — 6 m/sek roz-



Rys. 113.

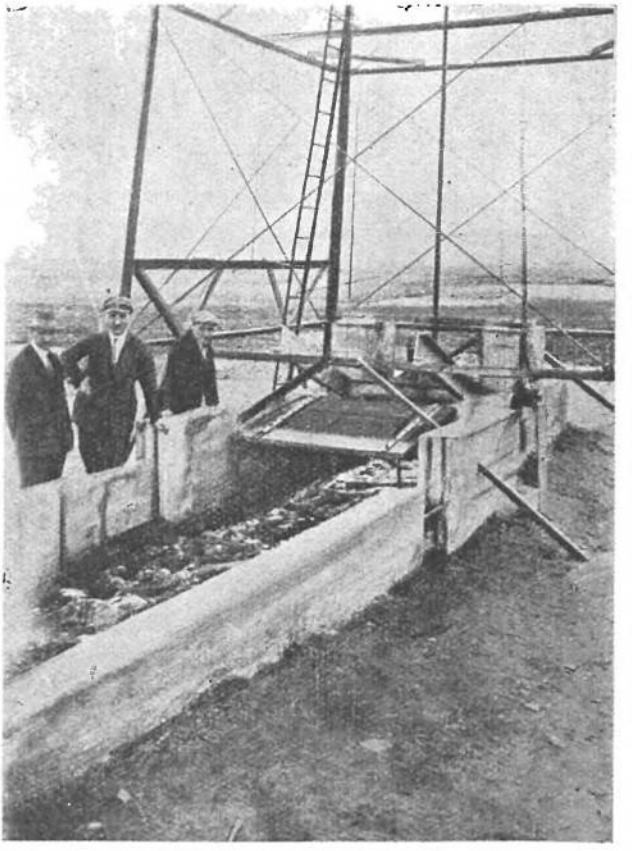
winąć może na wale pionowym moc około 3 KM, a przy większych szybkościach znacznie większą. Wirnik umieszczony jest na wieży o wysokości 27 m; nogi wieży zabetonowane są w fundamentach, założonych na głębokości 3,5 m.

Wiatrak uruchamia ślimak dwuzwojowy o średnicy 80 cm i długości 6 m, nachylony normalnie pod kątem 20° do poziomu i umieszczony w korycie z blachy żelaznej (rys. 113 i 114).

Największa wysokość podnoszenia wody wynosi 1,8 m. Kanał odpływowy, doprowadzający wodę do stawów, wykonany jest z betonu. Samoczynnie działająca klapa zwrotna zabezpiecza urządzenie od ruchu wody w kierunku odwrotnym w czasie postoju ślimaka w okresach ciszy.

Odpowiednie urządzenia umożliwiają samodzielne zasilanie stawów zarybkowych i kupieckich.

Po dwumiesięcznem pompowaniu, został osiągnięty pro-



Rys. 114.

jektowany poziom wody, przytem powierzchnia zalewu wzrosła do 44 ha, zawartość zaś wody w zbiorniku wynosi około 250 000 m^3. W ciągu 160 dni ślimak dostarczył 900 000 m^3 wody.

Całkowity koszt urządzenia wyniósł 28 030 zł. Z kwoty tej przypada: na koszty turbiny wietrznej wraz z wieżą — 12 000 zł., na ustawienie silnika i wieży oraz wykonanie fundamentu — 3 600 zł., na koszt czerpadła ślimakawego — 5 300 zł., na koszty

cła i przewozu — 2 780 zł.; na wykonanie fundamentu pod czerpadło, studzienki, kraty, koryta betonowego oraz ustawienie ślimaka — 4 350 zł.

Koszt zalania i utrzymania poziomu wody na 1 ha powierzchni stawów w ciągu sezonu hodowlanego wyniósł w r. 1928 niespełna 100 zł.

Ogólne wyniki zastosowania silnika wietrznego w opisanym przypadku były bardzo pomyślne.

Do wstępnych obliczeń urządzeń do zasilania stawów można przyjąć następujące dane co do zapotrzebowania wody: na wiosnę, przed okresem hodowlanym — 0,5 l/sek.ha; w okresie hodowlanym, ze względu na konieczność pokrycia strat wskutek parowania i przeciekania wody — 1 l/sek.ha przy pracy w ciągu całej doby, przy pracy zaś urządzenia w okresie krótszym — odpowiednio więcej.

Polska posiada około 70 000 ha stawów sztucznych oraz około 1 milj. ha nieużytków, z których część mogłaby być wyzyskana do stworzenia stawów rybnych.

Zarówno część stawów istniejących już, jak i powstających dopiero, wymaga lub będzie wymagała sztucznego zasilania wodą. Silniki wietrzne mogą w tej dziedzinie gospodarki oddać duże usługi.

4. **Zastosowanie wiatraków w młynarstwie oraz do napędu maszyn rolniczych.** Najszersze zastosowanie silniki wietrzne posiadały i posiadają do dziś dnia w młynarstwie.

Według danych A. Dzika[1]), Polska posiada około 6360 młynów wiatrakowych, rozsianych po całym kraju. Liczby wiatraków w poszczególnych województwach zestawione są w tabl. 35.

Rozmieszczenie młynów na obszarze Polski zaznaczone jest również na mapie, zamieszszczonej w końcu książki.

Jak wynika z przytoczonych danych, liczba wiatraków w poszczególnych połaciach kraju zależy tylko w nieznacznym stopniu od procentowości wiatrów.

Wpływają na nią jeszcze inne czynniki, mianowicie ukształtowanie terenu, obecność innych źródeł energji, bardziej rentownych, jak np. spadków wodnych na Pomorzu, ogólny stan uprzemysłowienia okolicy i t. p. Najbardziej rozpowszechnione są wiatraki w województwach Łódzkiem, Poznańskiem i War-

---

[1]) A. Dzik: Młynarstwo w Polsce, Warszawa 1928 r.
S. Kosińska-Bartnicka: Wiatry w Polsce i ich wykorzystanie. „Młynarz Polski" r. 1930, Nr. 8, str. 102.

Tablica 35.

Województwo	% wiatrów o prędkościach 3,5 ÷ 15 m/s.	Liczba wiatraków	% ogólnej liczby wiatraków w Polsce
Pomorskie	65	242	4
Poznańskie	48	1284	20
Warszawskie	34	1206	19
Białostockie	45	327	6
Wileńskie	29	34	0,6
Nowogrodzkie	35	106	2
Poleskie	49	176	3
Wołyńskie	50	459	7
Tarnopolskie	56	4	0,1
Stanisławowskie	40	—	—
Lwowskie	44	7	0,1
Lubelskie	22	703	11
Łódzkie	30	1346	21
Kieleckie	20	460	7
Krakowskie	20	5	0,1
Śląskie	20	1	—

szawskiem, podczas gdy na Wołyniu, Pomorzu, Podhalu i Polesiu liczba ich jest stosunkowo mała. Dość dużo wiatraków znajduje się na wyżynie Lubelskiej i w Kieleckiem, bardzo mało natomiast w Wileńszczyźnie, a na Podkarpaciu, od Pokucia aż do Śląska, — liczba zupełnie znikoma.

Stosunek procentu wiatraków do procentowości wiatrów użytkowych (przyjętych tutaj w granicach prędkości 3,5 ÷ 15 m/sek), wypada największy w województwach Łódzkiem, Warszawskiem, Lubelskiem, Poznańskiem i Kieleckiem, czemu sprzyjają zarówno obfite wiatry użytkowe, jak i ukształtowanie terenu (duże obszary nizinne, łagodne wzniesienia o spadkach od strony nawietrznej i t. p.) oraz dość duże uprzemysłowienie okolic. Na Pomorzu, pomimo największej ilości wiatrów użytkowych, liczba wiatraków jest mała, gdyż województwo to obfituje w dogodniejszą dla młynarstwa siłę wodną. Podobnie rzecz się ma we wschodnich połaciach kraju oraz wzdłuż całego Podkarpacia. Zwłaszcza na obszarach podgórskich zarówno obfitość spadków wodnych, jak i nader niekorzystny rozkład wiatrów, skłaniają przemysł młynarski do zupełnego niemal pominięcia siły wiatru, wyzyskiwanej przytem zazwyczaj w prymitywnych wiatrakach wiejskich. Wiatraki nowoczesne mogą jednak znaleźć szersze zastosowanie nawet i tam, gdzie dotychczas liczba ich jest znikoma.

Moc istniejących młynów wiatrakowych typu niemieckiego jest zazwyczaj niewielka i waha się w granicach od 3 do 10 KM. Młyny typu holenderskiego o kilku postawach posiadają moc dochodzącą do 10 — 20 KM.

Najmniejsza moc, od 2 do 5 KM, przy 110 — 150 obrotach żaren na minutę, niezbędna jest do grubego mielenia, do mielenia drobnego potrzeba już na jedną postawę przeciętnie od 5 do 8 KM.

Ogólne pojęcie o wydajności młynów i mocy odpowiednich do tego celu silników może dać zamieszczone niżej zestawienie (tabl. 36).

TABLICA 36.

Średnica żaren m	Liczba obrotów na minutę		Konieczna moc silnika KM	Średnica wirnika wietrznego D m
	w młynach zwykłych	w młynach walcowych		
0,45 — 0,60	180		~2	5 — 5,5
0,90	175	od 300	2,25	7,5 — 8,5
1,00	170	do 350	2,50	8 — 9
1,10	160		3,00	8,5 — 9,5
1,25	140		4,00	9,5 — 10,5
1,40	120		5,00	10,5 — 11,5
1,60	105		6,50	12 — 12,5

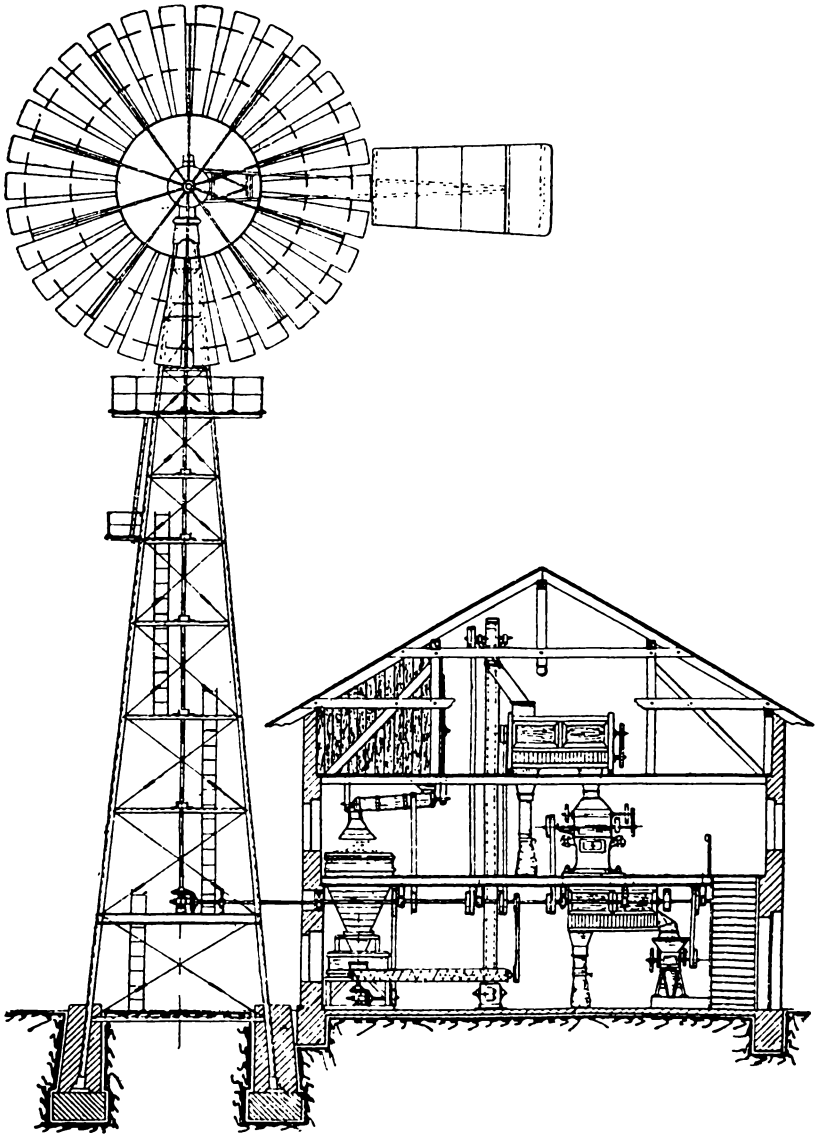
Schemat młyna wiatrakowego przedstawiony jest na rys. 115.

Poza młynarstwem, silniki wietrzne mogą mieć szerokie zastosowanie w gospodarstwie wiejskiem również do innych bardzo różnorodnych celów, jak np. do napędu młocarń, sieczkarń, maszyn do krajania buraków i t. p.

W przypadkach, gdy praca nie może być przerwana w czasie ciszy lub wiatru zbyt słabego, staje się niezbędnem posiadanie zapasowego napędu siłą koni za pośrednictwem kieratu. Zazwyczaj jednak konieczność użycia siły zwierząt pociągowych zachodzi bardzo rzadko.

5. **Zastosowanie silników wietrznych w różnych gałęziach przemysłu.** Chociaż silniki wietrzne, wskutek nieregularności wiatrów nie są w stanie zyskać rozpowszechnienia w dużym przemyśle, to jednak z powodzeniem mogą być stosowane w małych zakładach przemysłowych, jak np. stolarnie, ślusarnie, kuźnie, tartaki i t. p. Przykłady takich urządzeń o napędzie wiatrakowym widzimy na rys. 116, 117 i 118.

Silniki wietrzne, stosowane do napędu maszyn gospodarskich i rolniczych, posiadają przekładnię, przenoszącą ruch wału skrzydłowego na wał pionowy, zazwyczaj o stosunku 1 : 1.



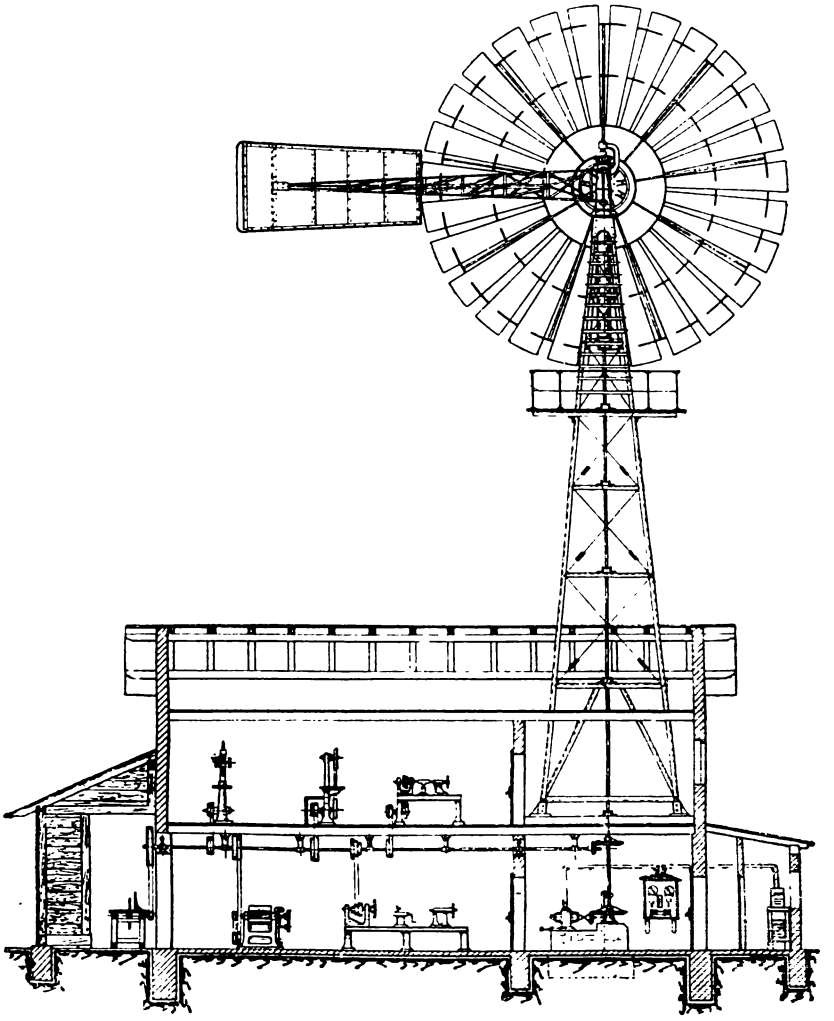
Rys. 115.

Dobór odpowiednich kół pasowych pędni pozwala na uzyskanie liczby obrotów niezbędnej do pracy poszczególnych maszyn. Zestawienie tych liczb podaje tablica 37.

TABLICA 37.

Maszyna	Liczba obrotów na minutę
Młocarnia	1000 — 2000
Sieczkarnia	100 — 200
Maszyna do krajania buraków .	50 — 60
Piła tarczowa	1000 — 3000
Wiertarka	2500 — 3000
Strugarka	3000 — 4000

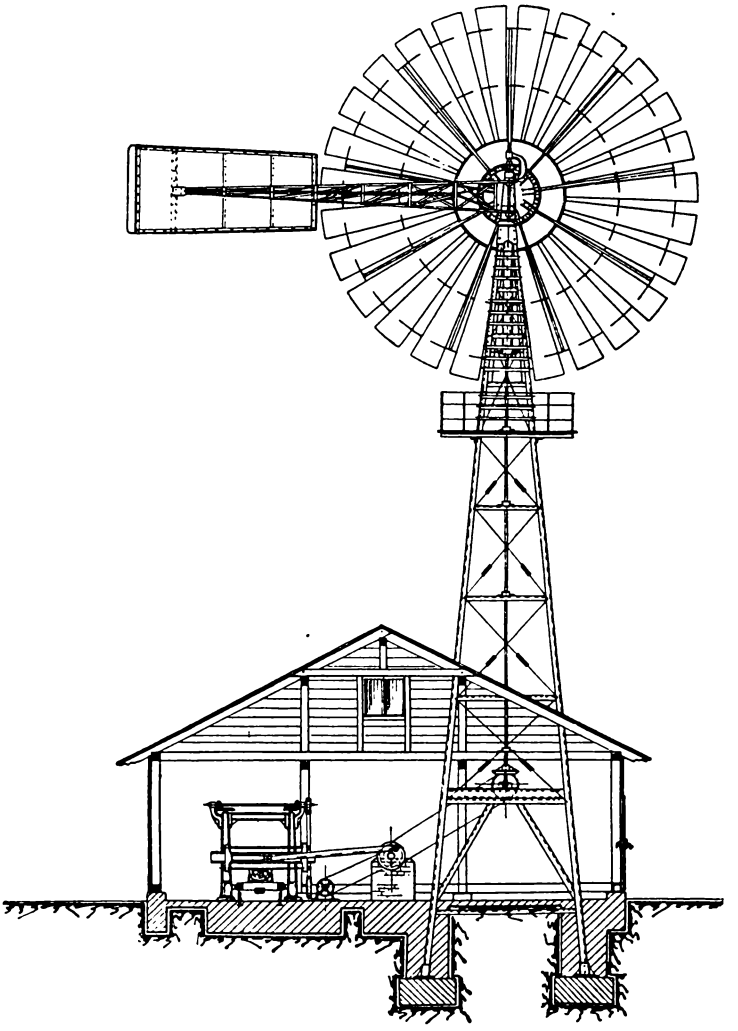
Stopień wyzyskania silnika wietrznego zależy nie tylko od prawidłowego obliczenia jego wymiarów, lecz również od



Rys. 116.

należytego rozmieszczenia zarówno silnika, jak i maszyn roboczych.

Przy projektowaniu urządzeń wiatrakowych szczególną uwagę należy zwracać na prostotę budowy i najkorzystniejsze przenoszenie ruchu od silnika do maszyn. Jako przykład racjo-

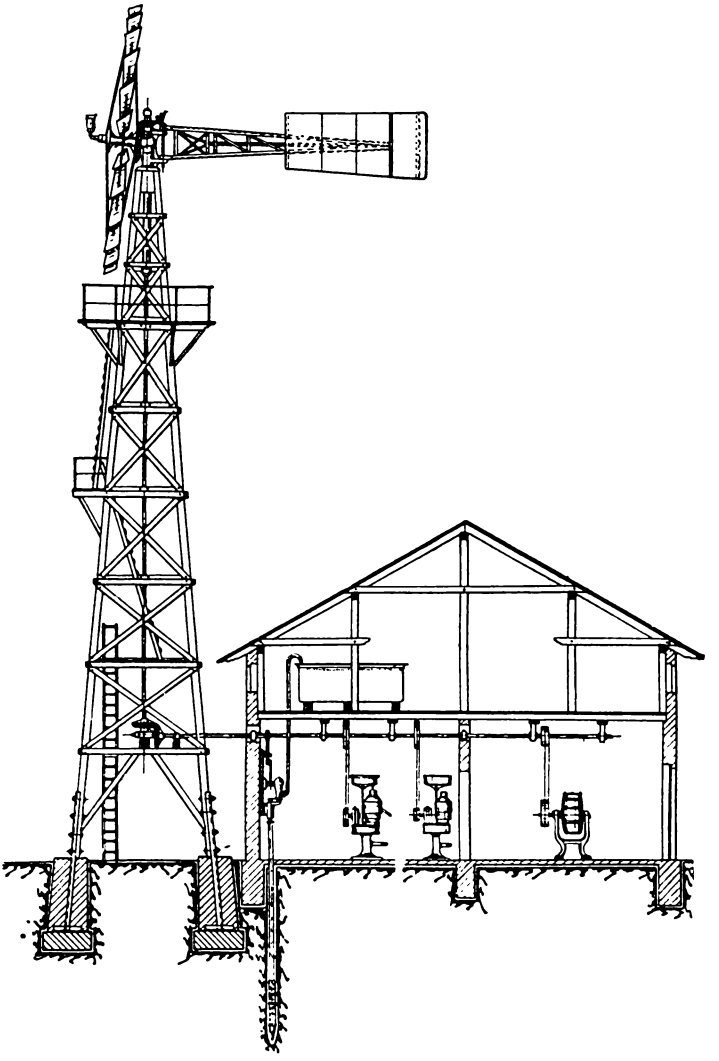


Rys. 117.

nalnego i zwartego rozmieszczenia poszczególnych części, może służyć urządzenie przedstawione na rys. 119.

Nie zawsze jednak udaje się rozmieścić pompę i wszystkie maszyny tak blisko siebie, jak w urządzeniu uwidocznionem na rysunku. Jeżeli osiągnięcie tego ze względu na warunki

miejscowe jest niemożliwe, to pożądanem jest przynajmniej umieszczenie silnika w pobliżu istniejącej studni lub innego źródła wody, w miarę możliwości ponad tą studnią. W ten sposób uzyskuje się najekonomiczniejszą pracę pompowania wody, która potrzebna jest niemal we wszystkich urządzeniach. Część



Rys. 118.

maszyn można umieścić w pobliżu silnika, pozostałe zaś w innem, bardziej odpowiedniem miejscu. Napęd tej ostatniej grupy maszyn może się odbywać zapomocą przekładni linowej, sięgającej często 20 do 100 m długości. Schemat takiego rozmieszczenia podany jest na rys. 120.

6. **Zastosowanie silników wietrznych do wytwarzania energji elektrycznej.** Silniki wietrzne, jak wynika z poprzednich opisów, mogą mieć dość szerokie pole zastosowań, najbardziej jednak różnorodne rozwiązania nasuwa zastosowanie ich do wytwarzania prądu elektrycznego. Nader wygodny sposób przesyłania energji na odległość, możność jej akumulowania oraz napędu małych maszyn, narzędzi i urządzeń, których bezpośrednie sprzęganie z silnikiem powoduje pewne trudności, — przemawiają bardzo często za pośredniem wyzyskaniem energji wiatru przez zamianę jej na energję elektryczną.

Nie należy jednak sądzić, by przy wyznaczaniu zakresu zastosowań energji elektrycznej, wytworzonej pracą wiatru, można było energję tę zużytkować przy obecnym stanie techniki w sposób dowolny. W rzeczywistości do tego celu nadaje się przedewszystkiem wieś. Elektryczność może tutaj oddać duże usługi zarówno przy oświetleniu, jak i przy napędzie różnorodnych maszyn rolniczych i urządzeń gospodarskich.

Prąd elektryczny może również znaleźć zastosowanie do robót galwanoplastycznych, spawania metali, wytwarzania tlenu i wodoru przez elektrolizę wody, ładowania akumulatorów i t. p. Nie poleca się natomiast stosowania energji elektrycznej do napędu maszyn ciężkich, ponieważ wymagałoby to instalowania dużych, a więc bardzo kosztownych, bateryj akumulatorów. W tym przypadku lepiej jest sprzęgać maszyny bezpośrednio z wałem wiatraka.

Jedną z dużych zalet wiatrakowego urządzenia prądotwórczego jest uniezależnienie jego właściciela od wahań cen paliwa, robocizny, przewozu i t. p.

Elektrownia wiatrakowa składa się z silnika wietrznego z pędnią, prądnicy, wzbudnicy, akumulatorów i samoczynnego regulatora napięcia i kierunku prądu, czyli t. zw. automatu elektrycznego, którego zadaniem jest przełączanie prądnicy, zależnie od szybkości wiatru, bądź na sieć, bądź na baterję akumulatorów; podczas ciszy automat ten przerywa połączenie prądnicy z akumulatorem, włączając ten ostatni do sieci.

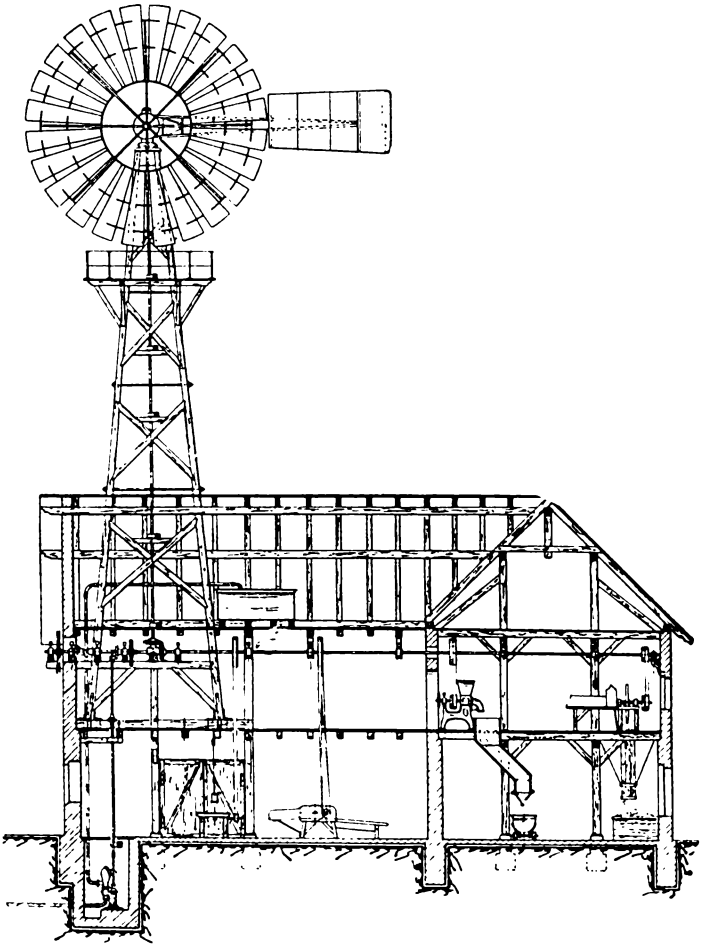
Silnik wietrzny do napędu prądnicy może być dowolnej budowy, najlepiej jednak nadają się do tego celu silniki szybkobieżne, np. silniki śmigłowe Bilau'a.

Prądnice w urządzeniach wiatrakowych stosuje się na prąd stały, bocznikowe, przystosowane specjalnie do pracy przy bardzo nierównomiernym biegu wiatraka wskutek zmienności siły wiatru. Zazwyczaj największe napięcie prądu odpo-

wiada szybkości wiatru równej $7 \div 9$ m/sek. Prądnice wywyrabiane są na następującc napięcia: 32, 65, 110 i 220 wolt.

Prądnice, wykonane specjalnie do współpracy z wiatrakami, mogą być sprzężone nie tylko z nowemi silnikami wietrznemi, lecz również i z silnikami już istniejącemi. Ogólny widok takiej prądnicy podany jest na rys. 121.

O ile zwykłe prądnice nie mogą być stosowane przy na-



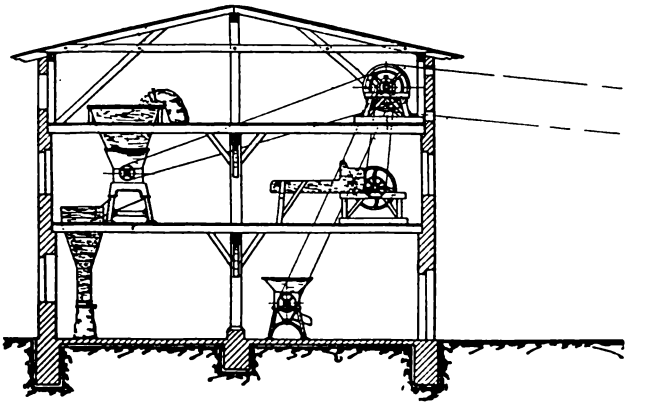
Rys. 119.

pędzie wiatrakowym, o tyle prądnice przystosowane do tego napędu mogą być również użyte przy wszelkim innym napędzie, np. siłą koni.

Akumulator elektryczny odgrywa w urządzeniach elektrycznych rolę podobną do roli zbiornika w urządzeniu wodo-

ciągowem. Baterja bowiem akumulatorów, pracująca równolegle z prądnicą, nie tylko stanowi zbiornik energji, lecz również wyrównywa różnice pomiędzy energją dostarczaną przez prądnicę a zużywaną w odbiornikach oraz łagodzi wahania napięcia.

Baterja akumulatorów ołowianych składa się z szeregu ogniw o przeciętnej sile elektromotorycznej 2 woltów. W celu uzyskania większego napięcia, akumulatory łączy się szeregowo, przytem siły elektromotoryczne poszczególnych ogniw dodają się. Chcąc naprzykład otrzymać na zaciskach baterji napięcie 36 woltów, należy zainstalować około 20 ogniw. Wielkość ogniw lub liczba połączeń równoległych zależy natomiast od zamierzonego odbioru energji i daje się wyznaczyć tylko na podstawie obliczeń przewidywanego obciążenia. W małych i średnich urządzeniach oświetleniowych instaluje się zazwyczaj akumulatory o wymiarach, zapewniających zapas energji na okres pięciu dni, przytem do rachunku przyjmuje się $^1/_3$ część całkowitego zapotrzebowania energji, wychodząc z założenia, że normalnie czynną jest jednocześnie tylko $^1/_3$ lamp. Okresy w ciągu doby, w których czynne jest oświetlenie, można



Rys. 120.

przyjmować następujące: w zimie — 6 godz., na wiosnę — 4 godz., w lecie — 2 godz. i jesienią — 4 godz.; przeciętnie w ciągu roku okres ten wynosi zatem 4 godz. na dobę.

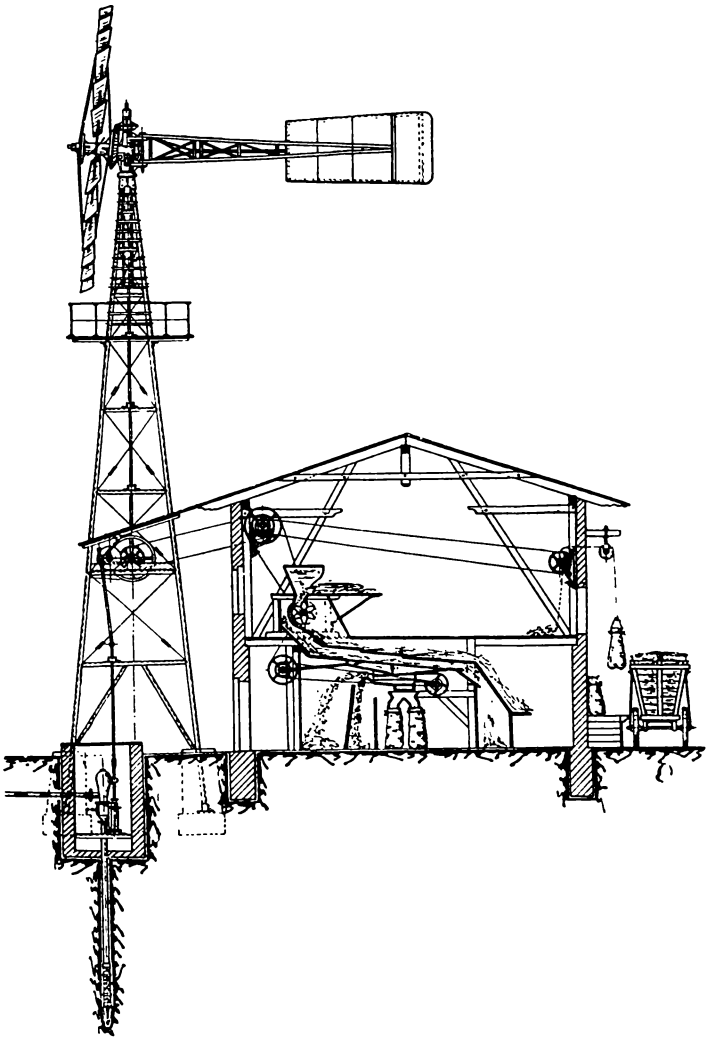
Dla przykładu obliczymy wymiary wiatraka, moc prądnicy i pojemność baterji akumulatorów do oświetlenia w zimie zapomocą 90 żarówek 20-watowych. Zapotrzebowanie energji dla $^1/_3$ wszystkich żarówek w ciągu doby wyniesie $\frac{90}{3} \cdot 20 \cdot 6 = 3600$ watogodzin, czyli 3,6 kWgodz. Przyjmując, że straty energji

w przewodach wyniosą 50 %, znajdziemy całkowite zapotrzebowanie energji w ciągu doby:

$$3600 \cdot 1{,}5 = 5400 \text{ Wgodz.} = 5{,}4 \text{ kWgodz.} = \frac{5400}{736} = 7{,}5 \text{ KMgodz.}$$

Jeżeli taki silnik wietrzny ma pracować przeciętnie 5 godzin na dobę, to powinien posiadać moc:

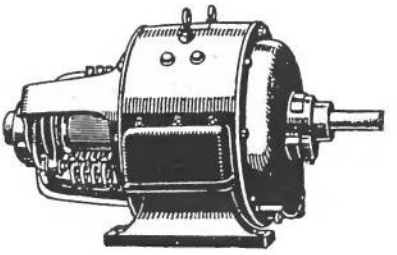
$$\frac{7{,}5}{5} = 1{,}5 \text{ KM.}$$



Rys. 120.

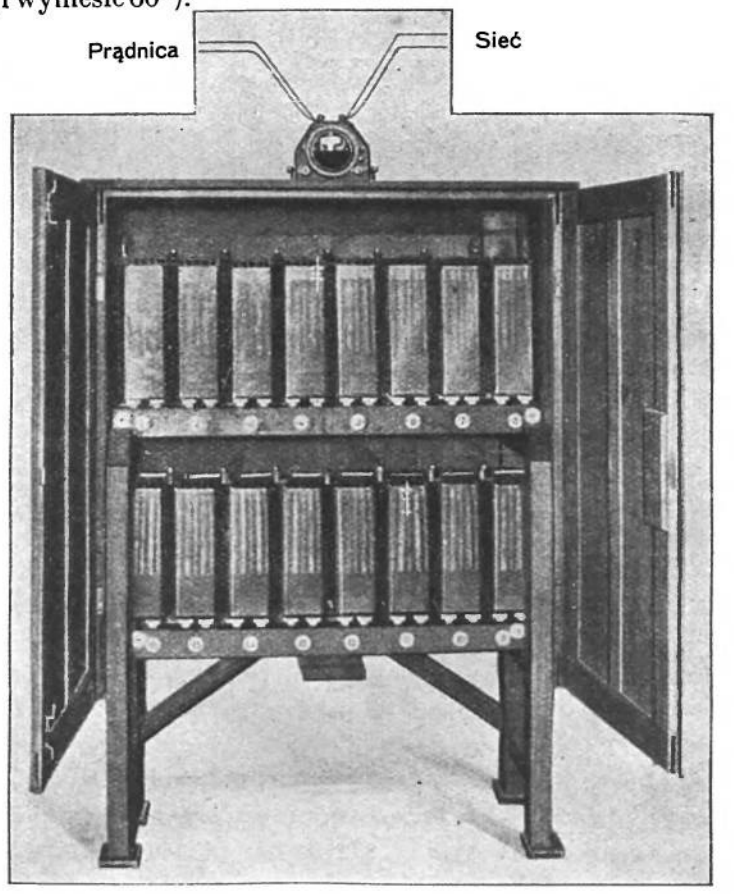
W urządzeniu projektowanem należy więc zainstalować silnik o mocy 1,5 KM, np. turbinę wietrzną systemu „Herkules" o średnicy 6,5 m, która przy szybkości wiatru 5 m/sek

rozwija moc około 1,75 KM. Turbina ta, przy szybkości wiatru 8 m/sek, posiada moc ok. 7 KM. Jeżeli przytem, dzięki odpowiedniej regulacji, silnik mimo dalszego wzrostu siły wiatru nie zwiększa swej mocy, to prądnicę należy dobrać odpowiednio do tej największej mocy, równej 7 KM.



Rys. 121.

Co do baterji akumulatorów, to przy zapasie energji na 5 dni pojemność jej powinna być równa $5400 \cdot 5 = 27\,000$ watogodzin, lub, jeśli zamierzone napięcie prądu wynosi 110 wolt, $\frac{27000}{110} = 250$ amperogodzin. Odpowiednio do napięcia liczba ogniw baterji wyniesie 60[1]).



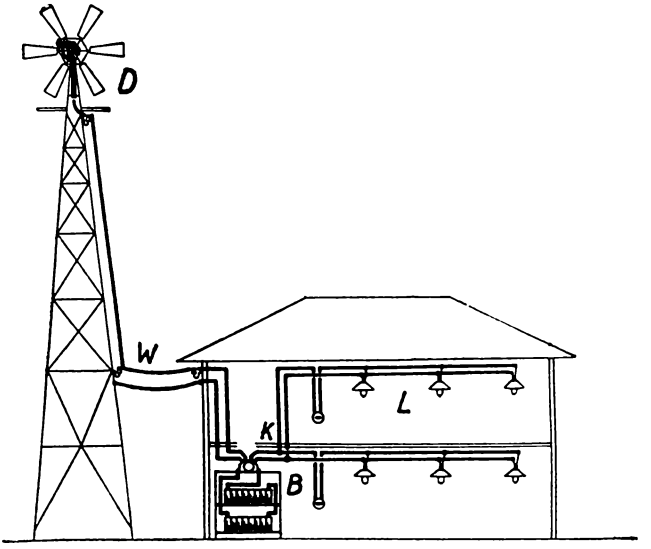
Rys. 122.

[1]) Patrz tabl. 38.

Jeżeli okolica obfituje w wiatry bardzo silne lub stale wiejące, to baterja akumulatorów może być mniejsza, mogąca np. pokryć $2 \div 3$-dniowe zapotrzebowanie energji.

Ogólny widok baterji akumulatorów, składającej się z 16 ogniw, przedstawiony jest na rys. 122.

Rys. 123 stanowi schemat połączeń akumulatorów z prądnicą i siecią. Prąd elektryczny, wytwarzany w prądnicy *D*, umieszczonej w tym przypadku na osi turbiny wietrznej, płynie przewodnikami *W* najpierw do specjalnego regulatora *K*, znajdującego się na skrzyni z akumulatorami, następnie zaś bądź całkowicie do sieci *L*, bądź też tylko częściowo, jeżeli



Rys. 123.

część prądu zostanie skierowana do ładowania rozładowanego akumulatora *B*.

Budowa regulatora *K* bywa rozmaita[1]), przytem niektóre typy tego aparatu rozwiązują zagadnienie regulacji prądu zupełnie zadawalająco, dzięki czemu wykorzystanie wiatru do wytwarzania energji elektrycznej staje się dziś nadzwyczaj dogodne. Na rysunku 124 uwidoczniony jest bardzo prosty re-

[1]) Opisy podobnych urządzeń można znaleźć w następujących książkach:

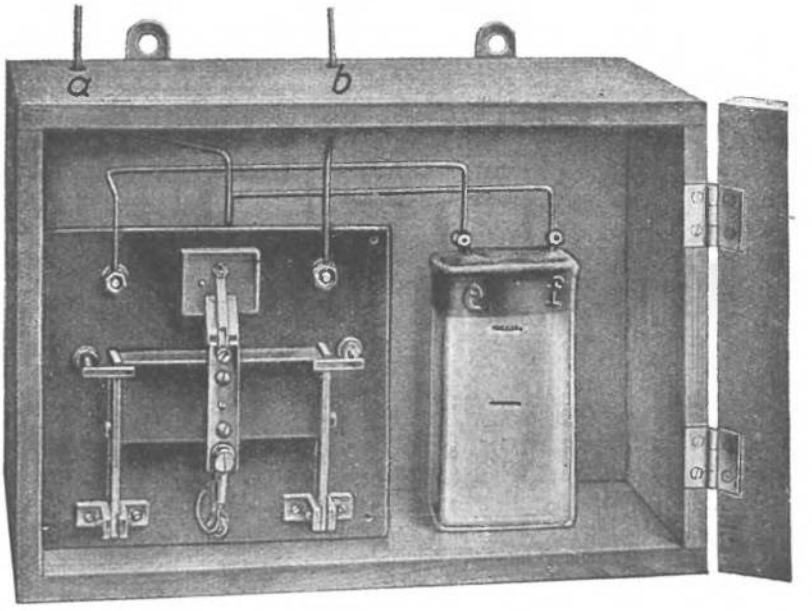
Hammel.—Die Ausnutzung der Windkräfte, 1924, Berlin.

Kažinskij. — Wietrosiłowyje ustanowki, 1928, Moskwa.

Choduszin. — Wietrianyje dwigatieli, 1923, Berlin.

gulator pomysłu Dr. Liebe'go, stosowany przez firmę Vereinigte Windturbinen-Werke A. G. w Dreźnie, na rys. zaś 125 podany jest schemat połączeń regulatora.

Regulator ten składa się z dwóch aparatów, mianowicie z t. zw. automatu i ogniwa polaryzacyjnego. Główną częścią automatu jest elektromagnes z rdzeniem w kształcie podkowy. Ponad biegunami magnesu zawieszona jest płytka żelazna, zaopatrzona na górnej stronie w kontakt szczotkowy i sprężynę, przeciwdziałającą powstawaniu styku pomiędzy szczotką a zaciskiem baterji akumulatorów. Elektromagnes posiada podwójne uzwojenie: jedno z dużą liczbą zwojów drutu cienkiego, drugie zaś z małą liczbą zwojów drutu grubego. Oba uzwoje-

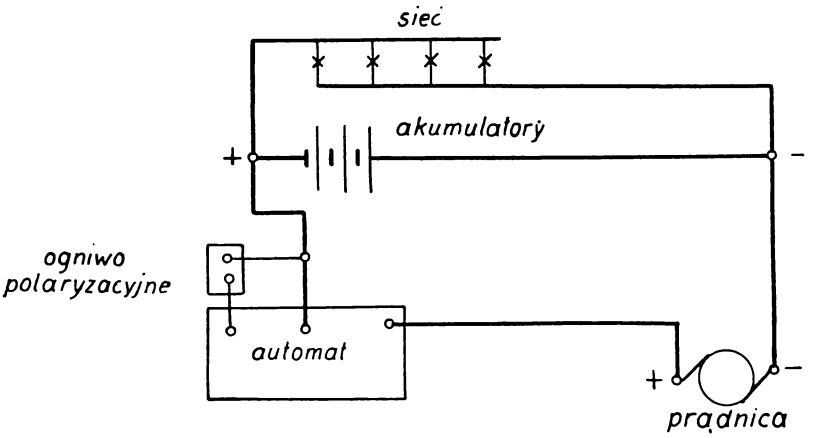


Rys. 124.

nia połączone są jednym końcem z zaciskiem prądnicy, natomiast drugi koniec uzwojenia cienkiego połączony jest poprzez ogniwo polaryzacyjne z akumulatorem, drugi zaś koniec uzwojenia grubego ze szczotką kontaktową. Gdy przez uzwojenie z cienkiego drutu przepływa prąd, elektromagnes przyciąga pręt, zamykając wskutek zetknięcia szczotki z kontaktem obwód prądu głównego, płynącego z prądnicy do baterji. Prąd ten wytwarza w zwojnicy z drutu grubego, przez którą przepływa, dodatkowe pole magnetyczne, utrzymujące powstałe połączenie.

Ogniwo polaryzacyjne jest to szklany słój, napełniony kwasem siarkowym, w którym zanurzone są dwie elektrody: jedna z aluminjum, druga z ołowiu. Ogniwo to przewodzi prąd tylko w jednym kierunku, mianowicie od elektrody ołowianej do aluminjowej. W regulatorze umożliwia ono przepływ prądu tylko w kierunku od prądnicy do baterji akumulatorów, przytem dopiero wtedy, gdy napięcie na zaciskach prądnicy przewyższy napięcie baterji o około 5 woltów. Ogniwo polaryzacyjne zaczyna już przewodzić prąd o małem natężeniu równem $0{,}1 \div 0{,}5$ amp. Gdy prąd wzrośnie do tej wielkości, elektromagnes przyciąga płytkę żelazną i zamyka obwód główny; od tej chwili prąd, omijając ogniwo polaryzacyjne, przepływa bezpośrednio po przez grube uzwojenie.

Jeżeli natomiast wiatr ustaje i liczba obrotów prądnicy wskutek tego spada, maleje również napięcie, i osłabione pole

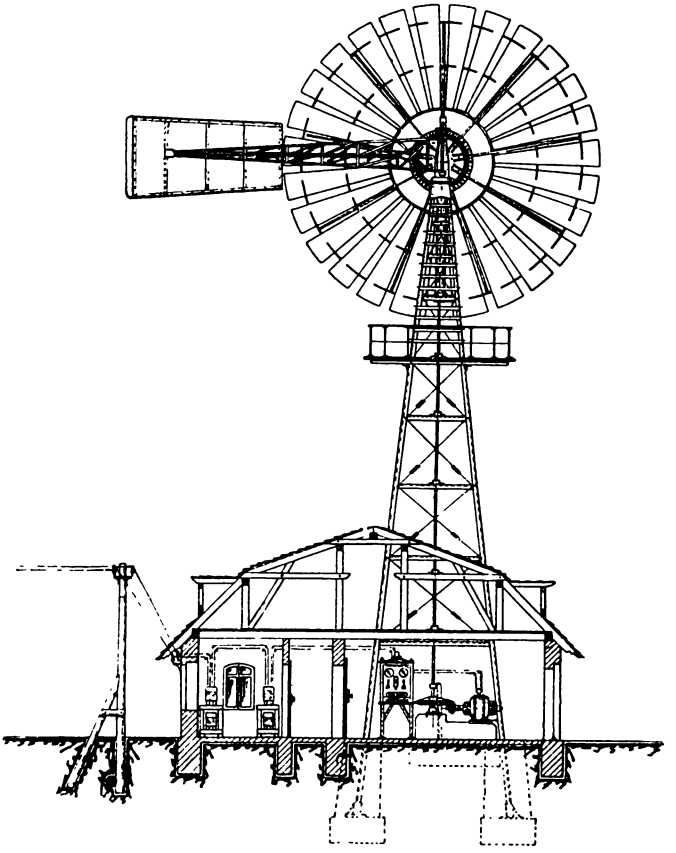


Rys. 125.

magnetyczne nie jest w stanie przezwyciężać w dalszym ciągu napięcia sprężyny, która odciąga od elektromagnesu płytkę ze szczotką kontaktową, przerywając w ten sposób obwód główny. Z prądnicy płynie wtedy do sieci słaby prąd przez ogniwo polaryzacyjne. Dzięki obecności tego ostatniego, niemożliwy staje się przepływ prądu w kierunku odwrotnym, t. j. z baterji akumulatorów do prądnicy.

Regulator tego rodzaju nie wymaga żadnej obsługi, jedynie ogniwo polaryzacyjne wymaga pewnego doglądu; w każdym razie należy je przynajmniej raz na pół roku oczyścić i napełnić świeżym kwasem. To też ze względu na tę okoliczność pewną

wyższość mają regulatory bez ogniw polaryzacyjnych, jak np. regulator Charlet'a.



Rys. 126.

TABLICA 38

Średnica wirnika wietrznego		m	5,5	6,5	7,5	8,5	10	12	15
Moc prądnicy		kW	2÷3	4÷6	5÷8	7÷10	8÷14	14÷20	20÷32
Pojemność akumulatora przy 10 godzinnem rozładowaniu	Napięcie 110 V 55÷60 ogniw	Amperogodz.	109	181	218	290	435	580	870
	Napięcie 220 V 120÷130 ogniw	Amperogodz.	--	—	109	145	218	290	435
Liczba żarówek po 25 watów (przeciętnie)		od	50	100	125	175	250	350	500
		do	100	200	250	350	500	700	1000

Rozmieszczenie poszczególnych części prądotwórczego urządzenia wiatrakowego zależy oczywiście od warunków miejscowych; jako przykład niechaj posłuży schemat jednego z podobnych urządzeń, podany na rys. 126.

Pewne pojęcie o mocy urządzeń wiatrakowych do wytwarzania energji elektrycznej i wymiarach odpowiednich wirników wietrznych daje tablica 38, dotycząca urządzeń „Adler" Köster'a.

ROZDZIAŁ VII.

Projektowanie silników wietrznych.

Kwestjonarjusz do projektu wykorzystania energji wiatru.—Obliczenia wstępne. — Oznaczanie mocy silników do napędu pomp. — Koszty budowy i eksploatacji silnikowych urządzeń wietrznych.

Inżynier projektujący urządzenia wiatrakowe musi posiadać duży zasób różnorodnych wiadomości, aby móc prawidłowo przewidzieć możliwe w danych warunkach zastosowania energji wiatru, obrać najodpowiedniejszy sposób tego zastosowania i wreszcie zaprojektować odpowiednie urządzenia i mechanizmy.

Niedostatecznie przemyślane projekty silników wietrznych, zbytnie zaufanie do danych katalogowych, podawanych przez różne firmy, mogą stać się przyczyną dużych rozczarowań.

Aby uniknąć rozczarowania, należy żądać od firm, wyrabiających silniki wietrzne, obliczeń mocy tych ostatnich nie tylko na wale skrzydłowym, jak to zazwyczaj bywa, lecz również i na wałach maszyn roboczych. Wspomniane obliczenia powinny opierać się na danych o wiatrach średniej szybkości w określonej miejscowości.

Co się tyczy spółczynnika wykorzystania energji wiatru ξ, to wielkość jego, podawaną przez firmy, można tylko wtedy uważać za godną zaufania, gdy oparta jest na bezpośrednich obserwacjach nad silnikami wietrznemi danego typu lub przynajmniej na wynikach doświadczeń z odpowiedniemi modelami w pracowniach aerodynamicznych.

Zazwyczaj projektowanie i obliczenia różnych części urządzeń silnikowych wietrznych powierza się firmom, które w budowie ich wyspecjalizowały się. Aby firma mogła opracować odpowiedni projekt, należy jej podać szereg danych, dotyczących warunków miejscowych i charakteru zamierzonego wy-

zyskania siły wiatru. Zamieszczony niżej kwestjonarjusz porusza zagadnienia niezbędne przy projektowaniu lub zamawianiu silników wietrznych.

1. **Kwestjonarjusz do projektu wyzyskania energji wiatru.**

A. Wiadomości ogólne.

1. Opis miejscowości: lesista, górzysta, równinna i t. p.
2. Przeciętna roczna szybkość w m/sek najbardziej długotrwałych wiatrów. Najczęściej obserwowany kierunek wiatrów. Długość okresów nieprzerwanej ciszy i częstość cisz w roku.
3. Istniejące przeszkody dla wiatru w promieniu 400 m od miejsca, w którem ma stanąć urządzenie silnikowe; a więc wysokość drzew i budynków oraz ich rozmieszczenie.
4. Opis miejsca pod projektowane urządzenie:w pobliżu rzeki, na wzgórzu, w otwartem polu, wśród zabudowań. Konieczność budowy specjalnej wieży lub możliwość przystosowania istniejącego budynku.
5. Odległość belek stropowych od ziemi, w wypadku gdy silnik można ustawić na gotowym budynku.
6. Wysokość budynku od ziemi do szczytu dachu.
7. Istnienie wpobliżu silników wietrznych lub innych, rzeki, strumienia, jeziora, stawy, bagna (załączyć szkic orjentacyjny rozmieszczenia istniejących zabudowań z zaznaczeniem miejsca projektowanego urządzenia.).

B. Pompowanie wody.

1. Głębokość wody w studni.
2. Odległość zwierciadła wodnego w studni od powierzchni ziemi.
3. Największa wysokość pompowania, licząc od najniższego poziomu wody w studni do najwyższego w górnym zbiorniku.
4. Odległość zbiornika od studni, mierzona w kierunku poziomym.
5. Projektowany wydatek wody w l w ciągu doby. W braku danych liczbowych co do zapotrzebowania wody, należy podać liczebność koni, bydła, owiec,

trzody i t. p. oraz powierzchnię ogrodów, które projektowane urządzenie ma zaopatrywać w wodę.

6. Średnica studni; głębokość studni. Jeśli woda ma być czerpana ze źródeł, należy podać pojemność istniejącego ewentualnie zbiornika.
7. O ile jest pompa, podać jej wymiary, t. j. średnicę i skok tłoka.

C. Nawadnianie i odwadnianie.

1. Wielkość powierzchni, przeznaczonej do odwodnienia.
2. Rodzaj zlewni, z której spływa woda na teren omawiany (pożądane jest dołączenie mapki tej zlewni w skali 1 : 100 000); zaznaczyć ewentualnie istnienie źródeł.
3. Cel odwodnienia gruntów.
4. Wielkość powierzchni, przeznaczonej do nawodnienia.
5. Rodzaj gruntu (bardzo przepuszczalny, średnio przepuszczalny, mało przepuszczalny); rodzaj przewidywanej roślinności.
6. Wielkość opadów miesięcznych (bardzo duże, średnie, bardzo małe).

D. Napęd maszyn.

1. Rodzaj maszyn, przeznaczonych do napędu wiatrakiem.
2. Przybliżona moc każdej z maszyn w KM.
3. Zaznaczyć, które maszyny mają pracować równocześnie.

E. Wytwarzanie prądu elektrycznego.

1. Zamierzona liczba lamp; światłość poszczególnych lamp lub zużywana przez nie moc (w watach).
2. Liczba lamp czynnych oraz liczba godzin oświetlania w ciągu doby.
3. Liczba oraz moc silników elektrycznych.
4. Liczba godzin pracy silników w ciągu doby.

2. **Obliczenia wstępne.** Aczkolwiek ostateczne wykonanie projektu silnika wietrznego oraz związanych z nim urządzeń najlepiej jest powierzyć, jak wspomniałem, odpowiedniej firmie, to jednak pożyteczne jest wykonać przedtem obliczenie wstępne.

Przebieg obliczenia wstępnego, opartego na wzorach przytoczonych w rozdziale II-im, wyjaśni najlepiej następujący przykład:

Określić wymiary główne silnika wietrznego wolnobieżnego i szybkobieżnego, który przy szybkości wiatru $v = 6$ m/sek może rozwinąć moc 12 KM. Liczba śmig silnika wolnobieżnego wynosić ma 16, szybkobieżnego — 4. Stosunek $\frac{\omega r}{v}$ dla pierwszego $= 1{,}2$, dla drugiego zaś $\frac{\omega r}{v} = 5$.

1. Obliczenie rozpiętości skrzydeł D.

Jeżeli oznaczymy przez F m^2 pole koła opisywanego końcami śmig, zaś przez F' m^2 — część użyteczną tego pola, to moc wirnika według wzoru (25) wyrazi się zależnością:

$$L_d = \eta_1 \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{\sigma}{2} \cdot v^3 \cdot F' \text{ KM.}$$

Moc $L_d = 12$ KM $= 900$ kgm/sek; $\sigma = \frac{1}{8}$; $v = 6$ m/sek. Sprawność wirnika przyjmujemy $\eta_1 = 0{,}90$. Wobec tego

$$F' = \frac{L_d \cdot 27 \cdot 2}{\eta \cdot 16 \cdot v^3 \cdot \sigma} = \frac{900 \cdot 27 \cdot 16}{0.9 \cdot 16 \cdot 216} \cong 125 \text{ m}^2.$$

Uważając, że czynna powierzchnia wirnika rozpoczyna się w odległości równej $\frac{1}{3}$ promienia koła opisywanego końcami śmig, możemy, oznaczając przez D_1 czynną średnicę wirnika, napisać zależność:

$$F' = \frac{\pi D_1^2}{4} - \frac{\pi}{4}\left(\frac{D_1}{3}\right)^2 = \frac{2}{9}\pi D_1^2 = 125 \text{ m}^2.$$

Stąd:

$$D_1 = \sqrt{\frac{9 \cdot F'}{2\pi}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 125}{2\pi}} = 13{,}4 \text{ m.}$$

Wobec tego, że końce śmig wyzyskują w znacznie mniejszym stopniu energję wiatru, niż pozostała powierzchnia, wirnik wykonać należy o średnicy nieco większej od D_1, mianowicie:

$$D = D_1 + 0{,}44\, b \text{ m} \quad . \qquad (58)$$

Wartość b oraz średnicę D określimy niżej.

2. Obliczenie szybkości c m/sek na końcach skrzydeł:

		Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
Szybkość wiatru v	m/sek	6	6
$v' = \frac{2}{3} v$	m/sek	4	4
$\frac{u}{v}$		1,2	5
$u = \omega . r$	m/sek	7,2	30
$\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'} = \frac{3}{2} \cdot \frac{u}{v}$		1,8	7,5
β		61°	82°30'
$\cos\beta$		0,485	0,13
$c = \sqrt{v'^2 + u^2}$	m/sek	8,2	30,3

3. Obliczenie wielkości b, średnicy D i liczby obrotów wirnika n.

		Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
Liczba śmig		16	4
Rozstęp śmig $a = \frac{\pi D_1}{Z}$	m	2,63	10,52
Szerokość strumienia wiatru $b = a . \cos\beta$	m	1,28	1,37
Średnica $D = D_1 + 0{,}44\ b$	m	14	14
Obwód πD	m	44	44
Szybkość kątowa $\omega = \frac{u}{\frac{D}{2}}$		1,03	4,28
Liczba obrotów $n = \omega \frac{60}{2\pi}$	$\frac{\text{obr.}}{\text{min}}$	9,8	40

4. Obliczenie średniej szerokości skrzydła l w odległości $^2/_3$ promienia wirnika od osi wału.

		Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
$2\pi r = \frac{2}{3}\pi D$	m	29,3	29,3
$\frac{u_{^2/_3}}{v} = \frac{^2/_3 u}{v}$		0,8	$3^1/_3$
$\frac{c}{v} = \sqrt{\left(\frac{v'}{v}\right)^2 + \left(\frac{u}{v}\right)^2}$		1,04	3,4
Kąt natarcia wiatru α		3°	2°
Spółczynnik C_y dla typów Nr. 2 i Nr. 3		0,8	0,9
Najkorzystniejsza szerokość skrzydła $l_{opt.} = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{8}{9 . C_y} \frac{v}{u} \cdot \frac{v}{c}$	m	2,50	0,50

5. Obliczenie ustawienia skrzydła w odległości $^2/_3$ promienia.

	Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
$\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'} = \frac{3}{2} \cdot \frac{u}{v}$.	1,2	5
β	50°	78°50′
Kąt natarcia wiatru α	3°	2°
Kąt ustawienia skrzydła w stosunku do kierunku wiatru $(\beta + \alpha)$	53°	80°50′

6. Obliczenie szerokości skrzydła i jego ustawienia na zewnętrznym obwodzie wirnika.

	Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
$2\pi R = \pi D$ . . . . . m	44	44
$\frac{c}{v} = \sqrt{\left(\frac{v'}{v}\right)^2 + \left(\frac{u}{v}\right)^2}$	1,37	5,04
$\frac{u}{v}$	1,2	5
Kąt natarcia α	2°	2°
Spółczynnik C_y	0,7	0,9
$t_{opt.} = \frac{2\pi R}{z} \cdot \frac{8}{9C_y} \cdot \frac{v}{u} \cdot \frac{v}{c}$. m	2,14	0,72
$\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'} = \frac{3}{2} \cdot \frac{u}{v}$ . . .	1,8	7,5
β	61°	82½°
Kąt ustawienia skrzydła $(\alpha + \beta)$	63°	84½°

7. Obliczenie szerokości skrzydła i jego ustawienia na wewnętrznym obwodzie wirnika.

	Silnik wolnobieżny	Silnik szybkobieżny
$2\pi r = \frac{1}{3}\pi D$ . . . . . m.	14,67	14,67
$\frac{u}{v}$	0,4	$\frac{5}{3}$
$\frac{c}{v} = \sqrt{\left(\frac{v'}{v}\right)^2 + \left(\frac{u}{v}\right)^2}$	0,78	1,80
Kąt natarcia α	6°	2°
Spółczynnik C_y	1,0	0,9
$t_{opt.} = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{8}{9C_y} \cdot \frac{v}{u} \cdot \frac{v}{c}$ . . . . . m	2,6	1,2
$\operatorname{tg}\beta = \frac{u}{v'} = \frac{3}{2} \cdot \frac{u}{v}$	0,6	2,5
β	31°	68°20′
Kąt ustawienia skrzydła $(\alpha + \beta)$	37°	70°20′

3. **Nomogram.** Do niezbyt ścisłego, lecz szybkiego wyznaczania średnicy wiernika wiatraka dowolnego typu, np. turbiny wietrznej, można wykreślić nomogram, opierając się na zależności:

$$N = 0{,}000\,835\,\xi\,\frac{\pi D^2}{4}\,v^3 \text{ KM};$$

Przyjmując np. $\xi = 0{,}33$, otrzymamy:

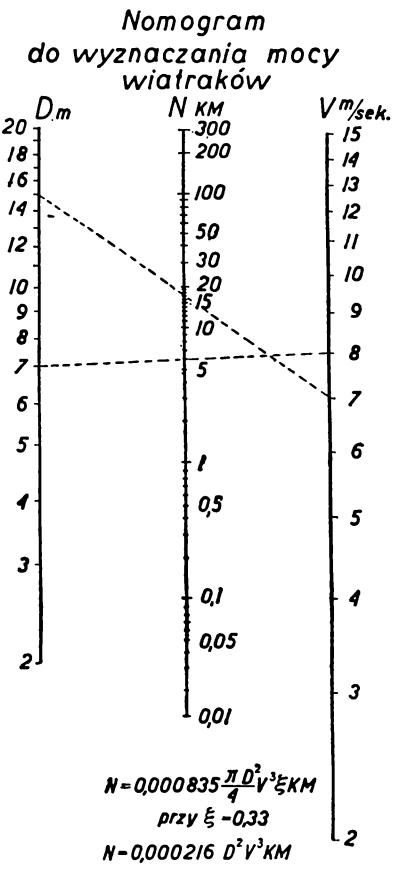
$$N = 0{,}000\,216\,.\,D^2\,.\,v^3 \text{ KM}.$$

Logarytmując, znajdziemy:

$$\lg N = \lg 0{,}000\,216 + 2\lg D + 3\lg v.$$

Nomogram zbudowany na podstawie tej zależności podany jest na rys. 127.

Korzystanie z tego nomogramu jest nader proste. Chcąc np. określić średnicę wirnika turbiny „Herkules" o mocy 16 KM przy szybkości wiatru 7 m/sek, prowadzimy przez odpowiednie punkty, 7 — na skali v i 17 — na skali N, prostą do przecięcia ze skalą D. Na tej ostatniej odczytujemy długość średnicy równą 15 m. W równie prosty sposób można określić prędkość wiatru, przy której wiatrak o średnicy np. $D=7$ m może rozwinąć moc około 6 KM. Kreśląc prostą przez punkty $D = 7$ i $N = 6$, odczytujemy na skali v prędkość 8 m/sek.



Rys. 127.

4. **Oznaczanie mocy silnika wietrznego do napędu pomp.** W przypadkach gdy silnik wietrzny instaluje się do napędu pomp wodnych oraz gdy przytem zachodzi możliwość wykorzystania w okresie cisz zbiornika wyrównawczego, moc silnika oblicza się w założeniu, że zbiornik nie może być nigdy całkowicie opróżniony. Jeżeli np. przyjmiemy dobowe

zapotrzebowanie wody do wodociągu lub nawilżania oraz odpowiadającą mu moc silnika jako 1, zaś pojemność zbiornika, mogącego pokryć rozchód wody w okresie trzydniowym, przez 3, to schemat harmonizacji pracy silnika i zbiornika w okresach ciszy, np. w maju i czerwcu, jak to miało miejsce przy nawilżaniu pól w Haifie (Palestyna), można przedstawić w sposób następujący:

Data

Maj 1908 r.															Czerwiec						
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7
Zawartość wody w zbiorniku wyrównawczym																					
3	2	$2^1/_3$	$1^1/_3$	$^1/_3$	$^2/_3$	1	$1^1/_3$	$1^2/_3$	$^2/_3$	1	$1^1/_3$	$^1/_3$	$^2/_3$	1	$1^1/_3$	$1^2/_3$	2	$2^1/_3$	$2^2/_3$	3	3
Praca silnika																					
0	0	$1^1/_3$	0	0	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	0	$1^1/_3$	$1^1/_3$	0	$1^1/_2$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	$1^1/_3$	1

Z przytoczonego schematu wynika, iż moc silnika w danym przypadku musiała wynosić $1\,^1/_3$ mocy niezbędnej do pokrycia dobowego zapotrzebowania wody. Przy tej mocy silnika zbiornik wyrównawcy nigdy nie był całkowicie opróżniony, zawierając w przypadkach najbardziej niekorzystnych ilość wody równą $^1/_3$ zużycia dobowego.

5. **Koszty budowy i eksploatacji urządzeń silnikowych wietrznych.** Wprawdzie energja wiatru nic nie kosztuje, jednakże koszt urządzeń, umożliwiających wyzyskanie jej, jest dość duży. Dlatego też przy projektowaniu wszelkich urządzeń silnikowych należy zawsze rozważyć możliwości zastosowania różnych rodzajów źródeł energji, zarówno pod względem kosztów zakładowych, jak i kosztów eksploatacji. Oczywiście, porównawcze rachunki kosztów budowy i ruchu winny być uskuteczniane możliwie na podstawie danych warunków miejscowych, obejmujących ceny robocizny i materjałów oraz ceny silników, wież i fundamentów, oferowane przez odpowiednie firmy.

Aby móc choć w przybliżeniu zdać sobie sprawę z kosztów różnych części silników wietrznych oraz związanych z niemi urządzeń pomocniczych, przytaczam niżej zestawienie cen, podawanych (w markach niemieckich) przez firmę „Vereinigte Windturbinen-Werke A.-G.".

Ceny zestawione w tablicach dotyczą danych z roku 1928. Obejmują one koszty poszczególnych części loco fabryka w Dreźnie bez przewozu i opłat celnych. Na podstawie przyto-

TABLICA 39.

Koszty turbin wietrznych „Herkules" do napędu maszyn i pomp.

Średnica wirnika $\frac{D}{m}$	Moc w KM przy szybkości wiatru			Cena silnika	Cena walu pionowego	Cena walu przekładni	Cena wciągarki ręcznej	Cena żelaznej wieżyczki (jeżeli cała wieża jest drewniana)
	5 m/sek	7 m/sek	8 m/sek	marek niemieckich				
2,5	0,36	1	1,5	613	4	15	32	92
3	0,5	1,5	2	685	6	16	32	101
3,5	0,7	2	3	789	6	16	32	110
4	0,9	2,5	3,5	990	7	17	60	115
4,5	1,2	3,5	5	1 115	7	17	60	119
5	1,5	4	5,5	1 482	9	20	65	133
5,5	1,7	4,5	7	1 652	9	20	65	137
6	2	5,5	8	2 213	12	27	70	156
6,5	2,3	6,5	9,5	2 411	12	27	70	165
7	2,5	7	10,5	2 924	14	33	72	215
7,5	3	8	12	3 083	14	33	72	233
8	3,3	9	13,5	3 696	16	40	100	297
8,5	3,7	10,5	15,5	3 917	16	40	100	315
9	4,5	12	17,5	4 509	18	44	100	384
10	5,5	14,5	21,5	5 474	19	49	180	475
11	6,5	17,5	26	6 957	21	56	235	512
12	7,5	25	30,5	8 261	22	66	250	548
13,5	9,5	26	39	11 189	24	90	272	758
15	12	32,4	48,5	14 261	26	112	375	959

TABLICA 40.

Koszty żelaznych wież do turbin wietrznych w średnicy wirnika m

Wysok wieży m	2,5	3 – 3,5	4 – 4,5	5 – 5,5	6 – 6,5	7 – 7,5	8 – 8,5	9	10	11	12	13,5	15
8	414	522	587	740	879	982	1200	1261	1305	1413	1566	2044	2435
10	544	674	722	892	1040	1153	1414	1522	1587	1716	1874	2414	2914
12	631	731	864	1022	1209	1435	1739	1827	1961	2153	2305	2857	3393
14	718	848	983	1218	1392	1718	2044	2166	2257	2518	2618	3348	4000
16	866	979	1170	1384	1561	1992	2348	2522	2674	2957	3079	3957	4696
18	957	1079	1414	1679	2000	2435	2800	2835	3109	3344	3492	4479	5348
20	1044	1305	1609	1870	2275	2653	3066	3218	3472	3827	4000	5087	6087
22	1130	1500	1826	2118	2544	2951	3348	3609	3892	4261	4370	5718	6774
24	1218	1640	1996	2322	2861	3348	3783	3935	4200	4500	4644	5998	7170
26	1414	1979	2196	2653	3109	3592	4018	4185	4318	4687	5218	6609	7479
28	1690	2300	2511	2944	3485	3856	4422	4540	4783	5131	5392	6735	7914
30	2000	2587	2957	3544	3905	4218	4827	4935	5240	5387	5609	7348	8609

TABLICA 41.

Koszty pomp ssąco-tłoczących.

Wydajność l/godz.	Cena mk. niem.	Wydajność l/godz.	Cena mk. niem.	Wydajność l/godz.	Cena mk. niem.
5 000	190	10 000	320	20 000	500
7 500	250	15 000	400	30 000	700

czonych cen można obliczyć całkowity koszt urządzenia wiatrakowego do różnych celów. Dla przykładu podaję w tablicy 44 zestawienie kosztów urządzenia do pompowania wody zapomocą ślimaka Archimedesa. Od cen katalogowych firmy udzielają zazwyczaj pewnych rabatów, dochodzących do 30%.

TABLICA 42.
Ceny ślimaków Archimedesa.

Średnica ślimaka cm	Wydajność przy szybkości wiatru 4—5 m/sek m³/min	Wysokość podnoszenia 1 m		Wysokość podnoszenia 2 m		Wysokość podnoszenia 3 m	
		Cena mk. n.	Średnica wirnika turbiny m	Cena mk. n.	Średnica wirnika turbinny m	Cena mk. n.	Średnica wirnika turbiny m
35	1	475	4	840	5	1210	6
40	2	525	4,5	925	6	1315	7
50	3	800	5,5	1360	7,5	2100	9
60	4	1030	6,5	1780	9	2440	10
70	5	1415	7	2265	10	3140	11
80	6	1800	8	2870	10	3925	12
90	7,5	2400	9	3640	11	4890	
100	9	2920	10	4620	12	6140	

TABLICA 43.
Ceny łożysk i przekładni.

Średnica wirnika m	2,5 do 3,5	4 do 4,5	5 do 5,5	6 do 6,5	7 do 7,5	8 do 8,5	9	10	11	12	13,5	15
Łożyska stopowe:												
dla ślimaków i silników . .	66	77	81	101	141	176	201	227	246	261	359	474
dla pomp . . .	79	87	96	119	166	208	238	268	291	309	424	560
Przekładnie stożkowe:												
1 : 1	60	70	101	119	133	151	183	244	256	284	380	495
1 : 4	74	101	133	174	206	247	284	320	379	425	583	740
1 : 6	110	156	201	256	366	489	576	617	685	735	1005	1279
dla ślimaków Archimedesa	74	101	133	174	206	247	284	320	379	425	583	740

Mimo bardzo dużych kosztów instalacji, silniki wietrzne, dzięki małym kosztom ruchu, mogą często współzawodniczyć pod względem rentowności z silnikami cieplnemi.

Szczególnie małe pozycje w rachunku rentowności stanowią koszty obsługi i smarów, pomijając już zupełny brak kosztów paliwa.

TABLICA 44.

Koszty urządzeń silnikowych wietrznych do nawadniania lub odwadniania gruntów.

Średnica wirnika wiatraka m		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10	11	12	13,5	15
Wysokość odpowiedniej wieży m		10	10	12	12	12	12	12	14	14	14	14	14	16	16	16	16	18	18
Cena w markach niemieckich	turbina wietrzna	685	789	990	1115	1482	1652	2213	2411	2924	3083	3696	3917	4509	5474	6957	8261	11189	14261
	wciągarka ręczna	32	32	60	60	65	65	70	70	72	72	100	100	100	180	235	250	272	375
	wieża żelazna .	674	674	864	864	1022	1022	1209	1392	1718	1718	2044	2044	2522	2674	2957	3079	4479	5348
	wał pionowy z łożyskiem stopowem i prowadzeniem . .	192	192	238	238	280	280	378	432	528	528	640	640	792	882	1008	1188	1900	2240
	czop główny . .	66	66	77	77	81	81	101	101	141	141	176	176	201	227	246	261	359	474
	przekładnia . .	74	74	101	101	133	133	174	174	206	206	247	247	284	320	379	425	589	740
	wał poziomy . .	61	61	65	65	80	80	106	106	148	148	180	180	220	250	290	330	410	500
	dolne belki podporowe . . .	115	115	140	140	142	142	171	181	190	190	225	225	261	360	365	442	560	880
	ślimak Archimedesa	410	440	480	530	800	840	930	1030	1420	1600	1800	2000	2400	2920	3640	4620	5800	7000
Koszt całkowity mk.niem.		2289	2443	3015	3190	4085	4295	5352	5897	7347	7686	9108	9259	11289	13287	16077	18856	25552	31818
Waga brutto kg. . . .		2180	2350	3020	3250	4300	4450	5500	6200	7850	8250	9800	10100	12200	14300	16550	19900	26100	33200
Objętość całkowita m^3 .		2,5	2,7	3,5	4,0	5,2	5,8	8,0	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	21,0	26,0	32,0	37,0

Stosunkowo małe rozpowszechnienie wiatraków w Polsce należy przypisać brakowi w kraju odpowiedniej gałęzi przemysłu, a więc związanym z tem dodatkowym kosztom przywozu i ceł oraz pewnej nieufności do trwałości i stateczności wiatraków przy silnych wiatrach. Co do tej ostatniej, to należy zaznaczyć, że psucie się nowoczesnych silników wietrznych zachodzi bardzo rzadko. Spostrzeżenia Inż. D-ra Mayersohn'a[1]), który z ramienia rządu palestyńskiego w r. 1920 zbadał w Niemczech i Danji 477 wiatraków, istniejących już od 2 do 23 lat, dowodzą, że konieczność napraw zachodzi rzadziej, aniżeli w silnikach cieplnych. Z wymienionej liczby wiatraków 36 obsługiwało wodociągi gminne, 137—wodociągi przedsiębiorstw prywatnych, stacyj kolejowych i t. p.; 175 — służyło do napędu maszyn rolniczych, pomp, młynów; 42 — odwadniania i nawadniania; 13 — pracowało w elektrowniach.

W okresie 23 lat poważniejszym uszkodzeniom uległo 1,5% wiatraków zbadanych. Powodem uszkodzeń nie była zawodna regulacja wiatraków, lecz drobne niedokładności, powstałe z czasem i niezauważone.

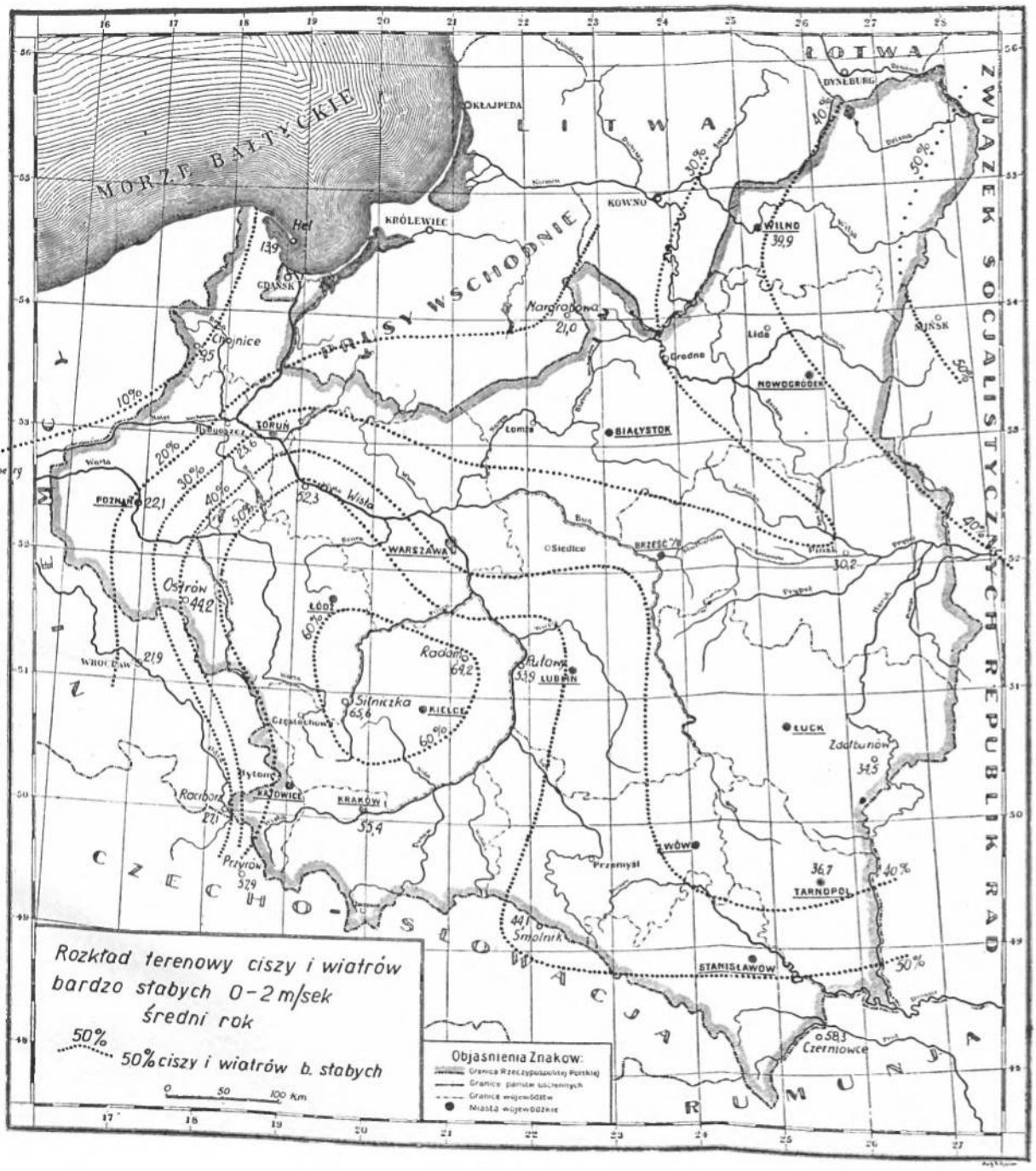
Stosunkowo najwięcej wypadków powstało z powodu rozluźnienia się śrub, które odrazu nie zostały dokręcone, powodując w następstwie poważne uszkodzenia wskutek uderzania skrzydeł o wieżę. Najczęściej więc istotnym powodem psucia się wiatraków jest niedostateczny dozór lub zupełny jego brak.

Zaznaczyć również trzeba, że budowa wiatraków w ostatnich czasach posunęła się znacznie naprzód zarówno pod względem udoskonalenia mechanizmów, jak i dzięki zastosowaniu dobrego samoczynnego smarowania. Wszelkie koła zębate i części obracające się pracują stale w oliwie, lub też smarowane są zapomocą specjalnej pompki. Wreszcie zwrócono uwagę na zabezpieczenie łożysk, kół zębatych, czopów i t. p. od kurzu zapomocą szczelnych osłon żelaznych.

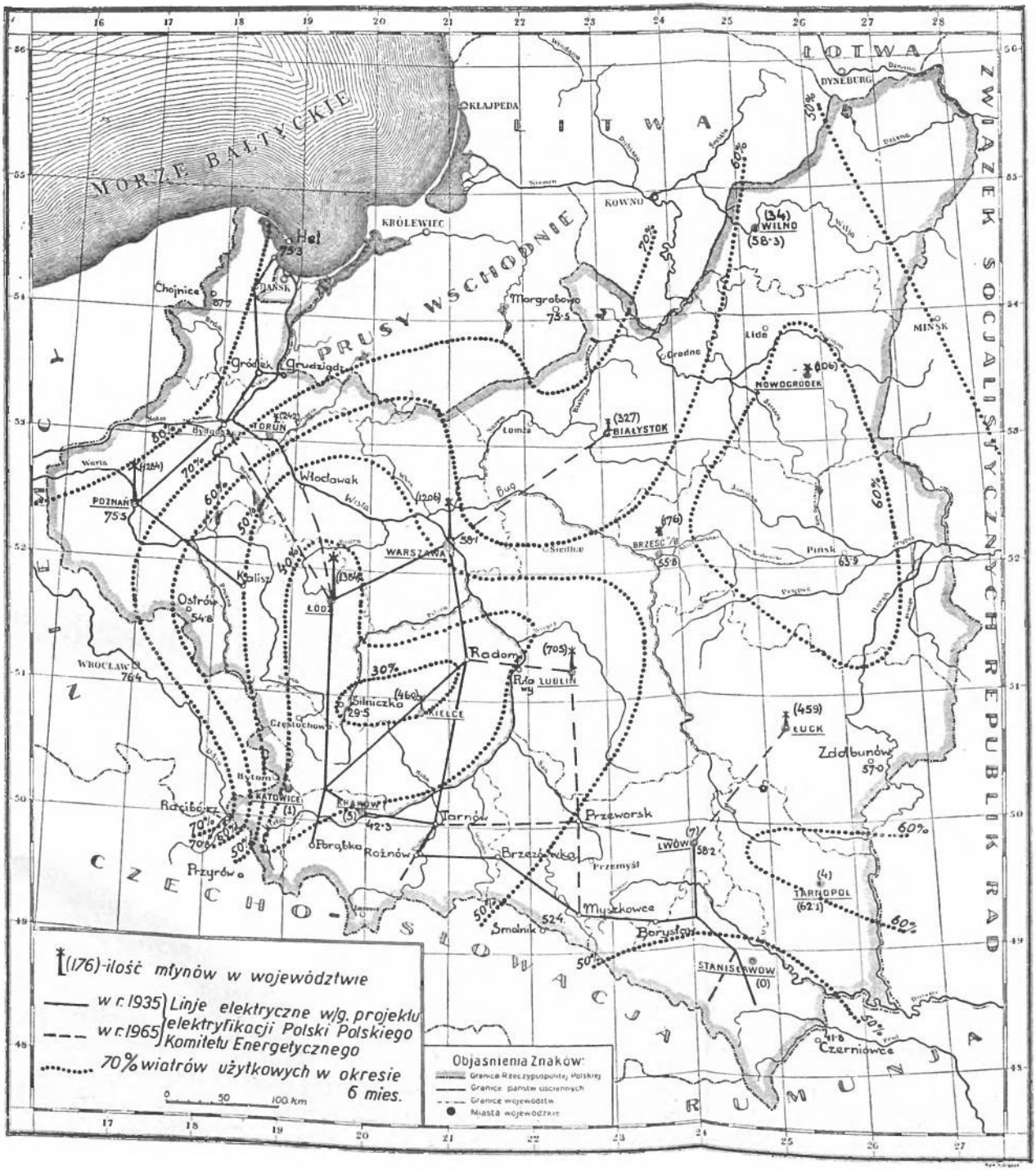
Dzięki tym wszystkim udoskonaleniom, silniki wietrzne są dziś maszynami trwałemi i zupełnie niezawodnemi w ruchu.

---

[1]) Inż. L. Czajkowski. Wiatraki, str. 18.



Rozkład terenowy ciszy i wiatrów bardzo słabych 0-2 m/sek
średni rok
50%
50% ciszy i wiatrów b. słabych
0 50 100 Km
Objaśnienia Znaków:
Granica Rzeczypospolitej Polskiej
Granice państw ościennych
Granice województw
Miasta wojewódzkie
MORZE BAŁTYCKIE
LITWA
ŁOTWA
PRUSY WSCHODNIE
ZWIĄZEK SOCJALISTYCZNYCH REPUBLIK RAD
CZECHO-SŁOWACJA
RUMUNJA
KŁAJPEDA
KRÓLEWIEC
KOWNO
DYNEBURG
WILNO
39,9
Hel
13,9
GDAŃSK
Chojnice
9,5
Margrabowa
21,0
Grodno
Lida
NOWOGRÓDEK
MIŃSK
BIAŁYSTOK
Łomża
TORUŃ
23,6
Bydgoszcz
POZNAŃ
22,1
Wisła
52,3
WARSZAWA
Siedlce
BRZEŚĆ n/B
Pińsk
30,2
Ostrów
44,2
ŁÓDŹ
Radom
64,2
Puławy
53,9
LUBLIN
WROCŁAW
21,9
Silniczka
65,6
KIELCE
Częstochowa
ŁUCK
Zdołbunów
34,5
Bytom
Racibórz
27,1
KATOWICE
KRAKÓW
55,4
Przyrów
57,9
LWÓW
Przemyśl
36,7
TARNOPOL
44,1
Smolnik
STANISŁAWÓW
58,3
Czerniowce
10%
20%
30%
40%
50%
60%
Landsberg



MORZE BAŁTYCKIE
ŁOTWA
LITWA
PRUSY WSCHODNIE
ZWIĄZEK SOCJALISTYCZNYCH REPUBLIK RAD
CZECHO-SŁOWACJA
RUMUNJA
KŁAJPEDA
KRÓLEWIEC
KOWNO
DYNEBURG
WILNO
MINSK
Hel
Chojnice
DANSK
Morgrabowo
Gródek
Grudziądz
TORUŃ
Bydgoszcz
Lida
Grodno
NOWOGRÓDEK
BIAŁYSTOK
Łomża
Włocławek
POZNAŃ
WARSZAWA
Siedlce
BRZEŚĆ
Pińsk
Kalisz
ŁÓDŹ
Ostrów
WROCŁAW
Radom
LUBLIN
Silniczka
KIELCE
Częstochowa
ŁUCK
Zdołbunów
Bytom
KATOWICE
Racibórz
KRAKÓW
Tarnów
Przeworsk
Porąbka
Rożnów
Brzezówka
Przemyśl
LWÓW
TARNOPOL
Przyrów
Myszkowce
Smolnik
Borysław
STANISŁAWÓW
Czerniowce
(176)-ilość młynów w województwie
w r. 1935
w r. 1965
Linje elektryczne w/g. projektu elektryfikacji Polski Polskiego Komitetu Energetycznego
70% wiatrów użytkowych w okresie 6 mies.
0 50 100 km
Objaśnienia Znaków:
Granice Rzeczypospolitej Polskiej
Granice państw ościennych
Granice województw
Miasta wojewódzkie

ROZDZIAŁ VIII.

Obszary Polski nadające się do wykorzystania energji wiatru.

Wykorzystanie energji wiatru staje się racjonalne przeważnie w miejscowościach obfitujących w wiatry użytkowe i nie posiadających dostatecznych warunków do odpowiedniego wyzyskania innych źródeł energji.

Do wyjaśnienia, o ile w poszczególnych dzielnicach Polski siły wiatrów nadają się do wykorzystania, niechaj posłużą zamieszczone w pracy tej mapy: 1) terenów ciszy i wiatrów bardzo słabych, 2) terenów obfitujących w wiatry użytkowe z zaznaczeniem ilości energji z 1 m^2 wirnika wietrznego w ciągu roku (patrz. rys. 29), 3) przebiegu wiatrów użytkowych z zaznaczeniem liczby młynów oraz przyszłej sieci elektrycznej oraz mapa źródeł energji w Polsce, wydana w 1927 r. przez Polski Komitet Energetyczny.

Z map tych wynika, że środkowa część Polski, ograniczona linją odpowiadającą ilości energji równej 300 KMgodz z 1 m^2 wirnika wietrznego w ciągu roku, stanowi obszar wiatrów stosunkowo słabych. Podobne warunki posiadają zwłaszcza okolice Łodzi, Kielc i Radomia. Pomimo niekorzystnych warunków meteorologicznych, rozpowszechnieniu wiatraków w tych dzielnicach sprzyjają warunki miejscowe, do których można zaliczyć istnienie silnych i dość stałych wiatrów w poszczególnych dolinach. Dlatego też, np. w woj. Łódzkiem, chociaż wiatry użytkowe stanowią tylko 30% wszystkich wiatrów (p. tabl. 35), liczba wiatraków sięga 1346, podczas gdy np. w województwie Wołyńskiem, przy 50% wiatrów użytkowych, liczba wiatraków wynosi tylko 459, a w woj. Pomorskiem przy 65% tych wiatrów — zaledwie 242.

Można się spodziewać, iż, dzięki wymienionym warunkom, silniki wietrzne, zwłaszcza typów udoskonalonych, będą się rozpowszechniały i nadal w tych właśnie miejscowościach. Jednakże silnym współzawodnikiem staną się napewno w niedalekiej przyszłości elektrownie okręgowe, oparte na węglu (okrąg Katowice — Kraków) i zasilające energją elektryczną dalekosiężną sieć, biegnącą wgłąb wspomnianych terenów.

Drugim okręgiem ze słabemi wiatrami jest południowa podgórska część Polski. Tutaj współzawodniczyć z wiatrakami będą siły wodne lub nafta i gazy ziemne.

Następny z kolei obszar o słabych wiatrach obejmuje całą Wileńszczyznę i część woj. Nowogródzkiego. Tutaj rozpowszechnieniu wiatraków nie sprzyjają warunki meteorologiczne. Zapotrzebowanie energji pokrywać będzie drzewo i torf. Ogólnie można powiedzieć, iż ta połać kraju jest bardzo uboga pod względem źródeł energji.

Najkorzystniejsze warunki meteorologiczne, sprzyjające szerokiemu wykorzystywaniu energji wiatru, posiadają północno-zachodnie obszary Polski, leżące mianowicie na lewo od linji, łączącej Ostrów z Włocławkiem. Jednakże na Pomorzu współzawodniczą skutecznie z wiatrem siły wodne, uruchamiające oprócz licznych małych siłowni około 20 większych zakładów o mocy ponad 100 KM., dających razem około 6400 KM. Pozatem w projekcie jest budowa jeszcze 12 zakładów o sile wodnej o łącznej mocy 25 000 KM. Wyjątek stanowi tylko półwysep Hel, obfitujący w częste i silne wiatry, a jednocześnie pozbawiony innych źródeł energji. Tutaj zastosowanie silników wietrznych może się stać bardzo pożyteczne, zwłaszcza w powstających letniskach i uzdrowiskach.

We wschodnich i północnych połaciach Polski, na prawo i ku górze od linji 300 KMgodz, roczna energja wiatrów użytecznych jest niewiele mniejsza niż np. w dzielnicy poznańskiej. Tutaj jednakże zachowało się jeszcze dość dużo lasów, zwłaszcza na prawo od linji Białystok—Zdołbunów, które z jednej strony utrudniają wykorzystanie wiatrów, z drugiej zaś dostarczają paliwa, współzawodniczącego jako źródło energji z energją wiatru. Zalesienie tej części Polski jest następujące: w pow. Pińskim lasy zajmują 30,7% powierzchni powiatu, w pow. Kosowskim — 38,8%, w Łunińieckim — 35%, w Stolińskim — 35,9%, w Sarneńskim — 48,8%, w Brzeskim — 21,3%, w Kobryńskim — 11,3%, w Prużańskim — 14,4%, w Drohiczyńskim — 17,9%, w Lubomelskim—17,8%, w Równieńskim — 19,2%, średnio w województwie Wołyńskiem — 20,5%. Poza obszarami lesistemi istnieją tu jeszcze duże przestrzenie, gdzie energja wiatru może być z powodzeniem wyzyskana.

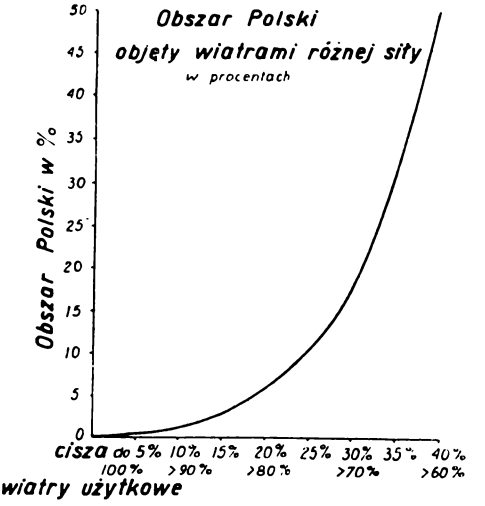
Okolice, położone na lewo i ku południowi od linji Białystok — Zdołbunów, posiadają charakter otwarty i bezleśny, a oprócz tego glebę żyzną oraz ubogie inne źródła energji. Dlatego też można oczekiwać tutaj szerszego rozpowszechnienia silników wietrznych wogóle, w szczególności zaś do wytwarzania energji elektrycznej, tembardziej, że w projekcie rozwoju

przyszłej elektryfikacji Polski zamierzone jest przeprowadzenie tylko jednej linji dalekosiężnej w kierunku Łucka, i to dopiero w 1965 r.

Streszczając omówione okoliczności, można przyjąć, że najważniejsze obszary, nadające się do wyzyskania energji wiatru, są następujące:

1) Pomorze (Hel),
2) woj Poznańskie,
3) Bezleśne obszary, ograniczone w przybliżeniu linją Warszawa — Toruń — rz. Wisła — granica północna do Niemna — Wołkowysk — rz. Prypeć na granicy z Z. S. R.R. — granica wschodnia — Wołoczyska — Lwów — Brześć n/B — Warszawa.

Oczywiście, pewne warunki miejscowe, mimo niekorzystnych warunków meteorologicznych, mogą sprzyjać rozwojowi silników wietrznych również i w innych dzielnicach Polski, czego dowodem jest duża liczba wiatraków w woj. Łódzkiem i woj. Warszawskiem. Ogólnie rzec można, że silniki wietrzne znaleźć mogą zastosowanie na obszarach wynoszących połowę terytorjum Państwa, co wynika również z wykresu na rys. 128.



Rys. 128.

Do rozpowszechnienia tej kategorji silników w Polsce nieodzowną staje się praca w kierunku:

1) naukowego zbadania silników wietrznych w celu określenia typów najbardziej odpowiadających warunkom polskim,
2) stworzenia w kraju taniej wytwórczości silników wietrznych, wież i czerpadeł ślimakowych oraz
3) propagandy udoskonalonych wiatraków wśród ludności.

LITERATURA

W języku polskim:

1. Z. Bartnicki. Prądy powietrzne dolne w Polsce. Warszawa, 1930, str. 98.
2. Z. Czajkowski. Wiatraki, str. 32.
3. Prof. Skotnicki. Technika odwadniania bagien. Warszawa, 1929, str. 116 — 133.
4. Prof. E. Kosiński. Zasady meteorologji. Lwów. 1927, str. 199.
5. Prof. Cz. Witoszyński. Aerodynamika. Warszawa, 1928, str. 239.
6. W. Chrzanowski. Wybór silnika. Lwów, 1917.
7. Inż. Tuszko. Gospodarstwo stawowe w Piotrkowicach. Warszawa, 1929, str. 12.
8. Prace Instytutu Aerodynamicznego w Warszawie. Zesz. IV. Warszawa, 1930, str. 96.
9. Polski Komitet Energetyczny. Zasoby energji w Polsce i stan ich wyzyskania. Warszawa, 1927, str. 15 (z mapą).
10. S. Kuszel. Częstotliwość wiatrów dolnych. Przegląd Techniczny, 1930 r., zesz. 37.
11. St. Kosińska-Bartnicka. Wiatry w Polsce i ich wykorzystanie. Młynarz Polski. 1930, zesz 6 i 8.

W języku rosyjskim:

1. Akademja Nauk. Jestiestwiennyje proizwoditielnyje siły Rossii. Tom 1. Petrograd, 1919.
2. Bolszaja Sowietskaja Encikłopedija. tom X, str. 562 — 571.
3. S. Briling. Ispolzowanje siły wietra dla celej wodosnabżenija. Moskwa, 1925, str. 86.
4. W. Dawydow. Wietrianyje dwigateli. Moskwa, 1927.
5. Debu. Wietrianyje dwigateli. Petersburg, 1904.
6. S. Dorożynskij. Rotor Flettnera. Berlin, 1925.
7. S. Żarkow, W. Żarkow i A. Smirnow. Wietier i jego prakticzeskije primienienija. Moskwa, 1925, str. 86.
8. N. Żukowskij. Tieoreticzeskije osnowy wozduchopławanja.. Moskwa, 1925, str. 306.
9. B. Każinskij. Wietrosiłowyje ustanowki. Moskwa, 1928, str. 308.
10. B. Każinskij. Wietrianaja elektriczeskaja stancja. Moskwa, 1925, str. 57.
11. W. Karpow. Wietrosiłowyje ustanowki. Leningrad 1927, str. 123.
12. N. Krasowskij i G. Sabinin. Problema ispolzowanja energii wietra. Moskwa, 1923.
13. Karta energeticzeskich resursow wietra S S S R. Moskwa, 1925,

14 G. Sabinin. Charakteristika wietrodwigatila. Trudy C. A. H. I. zesz. 28, Nr. 160. Moskwa, 1926.
15. G. Sabinin. Tieorja idealnogo wietriaka. Trudy C. A. H. I., zesz. 32, Nr. 200. Moskwa, 1927.
16. Prof. Satkiewicz. Aerodinamika kak teoreticzeskaja osnowa awiacii.
17. I. Smirnow. Problema ispolzowanja energiji wietra. Moskwa, 1925.
18. P. Fiedorow. Wietrianyje dwigatieli. Moskwa, 1917.
19. A. Fentekluz. Wietrodwigateili. Leningrad, 1927, str. 174.
20. S. Choduszin. Wietrianyje dwigatieli. Berlin, 1923, str. 92.

W języku niemieckim:

1. I. Ackeret. Das Rotorschiff und seine physikalischen Grundlagen, 1925, str. 48. Getynga.
2. Betz A. Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Getynga, 1926, str. 64.
3. Bericht über eine Studienreise in Holland zur Besichtigung von „Herkules"-Windturbinen im Jahre 1914.
4. Bilau K. Die Windkraft in Theorie und Praxis. Berlin 1927, str. 157.
5. Friedrich A. Kulturtechnischer Wasserbau, tom I. Berlin, 1923, str. 330 — 335.
6. Hammel. Die Ausnutzung der Windkräfte. Berlin. 1924, str. 119.
7. Herkules Windturbinen in Wort und Bild. Dresden, 1924, str. 80.
8. Honold F. Windräder und Windmotoren. Rawensberg, 1920, str. 36.
9. Konwiczka H. und Kiene P. Windmotore und Windräder. Lipsk, 1922, str. 39.
10. La Cour. Die Windkraft. Berlin, 1905.
11. Neumann F. Die Windkraftmaschinen. Lipsk 1907, str. 174.
12. Prandtl. Bericht über die Tätigkeit der Göttinger Modelversuchsanstalt. Berlin, 1910 — 1911.
13. Stertz O. Moderne Windturbinen. Lipsk, 1912, str. 174.
14. Honnef H. Windkraftwerke. Brunświk. 1932. str. 111.

W języku ukraińskim:

1. Prof. I. Szowheniw. Mechanyczna podibnis't' w hydrotechnyci. Podebrady, 1927, str. 29.
2. Prof. I. Szowheniw. Do pytannia pro wykorystannia witru pry melioraciji zemel. Ukrajińskyj inżener, 1931, zesz. 1, str. 16 — 23.

W języku czeskim:

1. Dr. Smetana. Mechanická podobnosť w hydrodynamice. 1926. Praha.
2. Prof. V. Hlavinka. Nauka o melioracích, úpravách toků a hrazení bystřin. Díl III. Meliorace. str. 278, Brno, 1928.