

GEORG VILLEMS

# TUULEMOOTORID

302.



RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

TALLINN 1946

S A A T E K S .

*Tuule-energia kasutamisele majapidamises veevarustuseks, elektri tootmiseks ja tööstusmasinate käitamiseks osutatakse üha suuremat tähelepanu nii meil kui mujal.*

*Sellest alast huvitatuile olen tahtnud käesoleva teosega ülevaadet anda tuule-energiast ja selle rakendamise võimalustest, tuulemootorite konstruktsioonidest ja esile tuua neid aluseid, mis on vajalikud tuulemootori-tüübi valikul.*

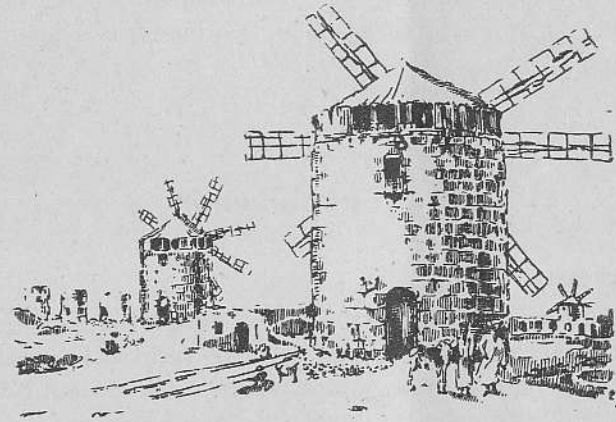
*Siinkohal avaldan südamlikku tänu kõigile neile õhusõidu- ja meteoroloogia-ala eriteadlastele, kelle innukal kaasabil on koostatud käesoleva raamatu 2. ja 3. osa.*

G. Villems.

## 1. Tuul energiaallikana.

Esimeseks õhu liikumise energia rakendamise viisiks oli kahtlemata veesõidukite liikumapanemine purjede abil. Hiljem kasutati purje vesiratta eeskujul, millest kujunesid tuulejõumasinad.

Õhu liikumise energia kasutamise probleemiga on inimesed tegelnud kõigi aegade jooksul ja ka praegune põlv on rakendunud selle lahendamisele, sest vee-energia hulk on piiratud ja tema kasutamine on seotud asukohaga.



Joon. 1. Vanad tuuleveskid Aleksandrias.

Maakera pindala on umbes 500 miljonit ruutkilomeetrit, millest umbes 150 miljonit km<sup>2</sup> on maismaad. Sellest pinnast 20 kuni 25 miljonit km<sup>2</sup> on tuulerikast ala. Viimasest võib ainult 10 kuni 15% hõlpsasti kasutamisele tulla; niisiis jääb tuulejõujaamade ehitamiseks 2 kuni 3 miljonit ruutkilomeetrit maa-ala.

Arvestades pindala  $400 \times 600 = 240\,000$  m<sup>2</sup> 12 000-kW tuulejõujaama püstitamiseks langeks iga kW kohta 20 ruutmeetrit. 2000 miljardil ruutmeetril võiksime tuulest saada vähemalt

$$\frac{2\,000\,000\,000\,000}{20} = 100 \text{ miljardit kW elektrienergiat.}$$



Seega ei oleks veel kõik tuule-energia rakendatud, sest 100 000 km merede kaldaid 20 km laiuselt võimaldaks veel saada 100 miljardit kW. Seega kogu maakera tuule-energia rakendamine annaks kokku 200 miljardit kW.

Tuule-energiat kasutati juba vanal ajal. Selle tõenduseks on vana Egiptuse linna Aleksandria läheduses tänini säilinud tuuleveskid, millede iga hinnatakse 3000 aastale (joon. 4).

Tehnika arenemisega on arenenud ka tuulemootorid, ning on kujunenud mitmed tuulemootori tüübid, milledest aga paljud on olemas alles kavanditena. Selle ala laiaulatuslikumaist kavatsusist võib nimetada H. Honnefi ideed (joon. 2 – mandril ja joon. 3 – merel).

## 2. Tuul kui õhuliikumine.

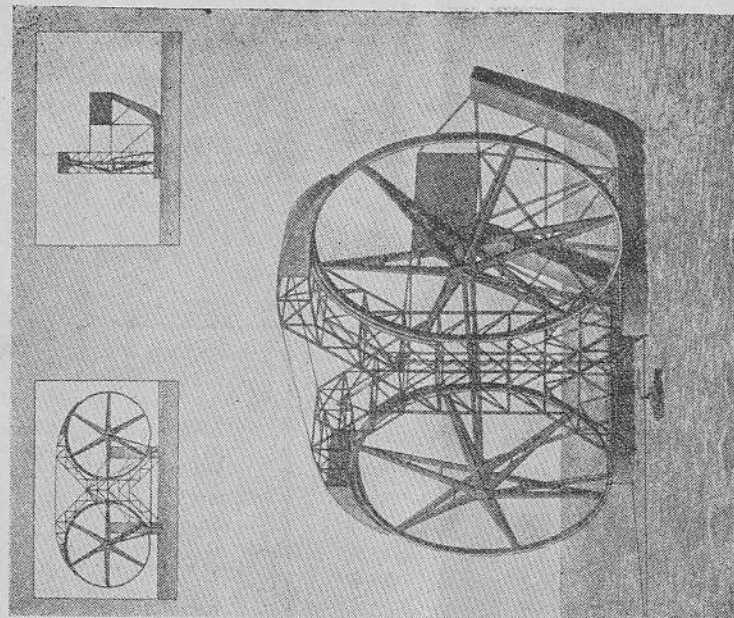
### a. Õhu raskus.

Maakera ümbritseb õhukiht. Õhk on värvitu gaasiline aine, mille keskmine erikaal  $\gamma = 1,226 \text{ kg/m}^3$  olenb rõkusest (veeaurusisaldusest), temperatuurist ning atmosfäärilisest rõhumisest. Näiteks suvel päikesepaistelistel palavatel ilmadega on õhk kuivem ja soojem ning seega kergem kui hilissügisel vihmaste ja külmade ilmadega.

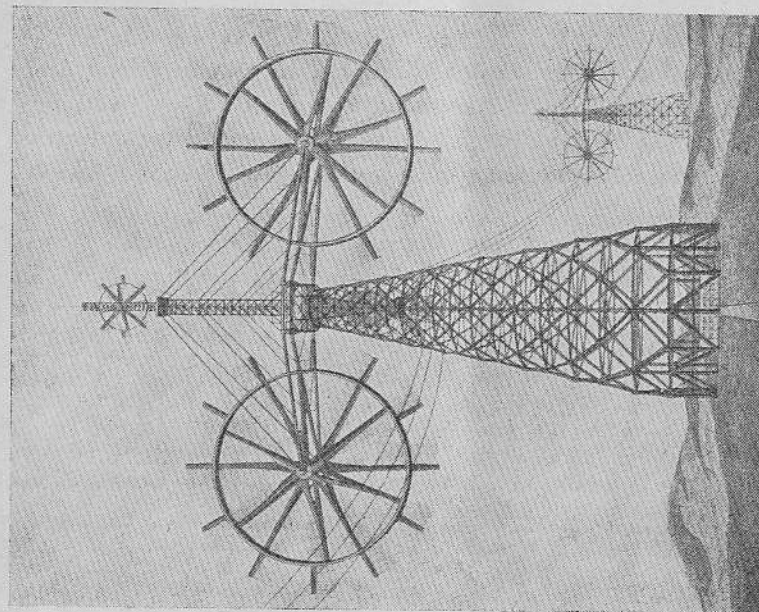
### b. Õhu liikumise kiirus.

Õhk võib liikuda horisontaalses ja vertikaalses suunas. Õhu liikumist horisontaalses suunas nimetatakse tuuleks. Tuule tugevuse määrajaks on õhu tihedus ja liikumise kiirus (tuule kiirus).

Varematel aegadel määrati tuule kiirust tuulikute käivitamisega kui ka merel purjetamisel kogunud isikute vaatluste alusel. Tuule kiirust määrati 10- või 12-astmeliste skaalade alusel tuule tugevuse tähistajate loodusnähtuste järgi. Säärast 12-astmelist skaalat tarvitas 1805. aastal inglise admiral Beaufort.



Joon. 3. Merel.



Joon. 2. Mandril.

H. Honnefi tuulejõuajamade kavandid.



Hiljem kujundati „Rahvusvaheline tuulte tugevuse skaala“ ehk nn. Beaufort'i skaala. Tabelis nr. 1 on märgitud tuulekiirused ja -surved selle skaala alusel.

Tabel 1. Beaufort'i skaala.

Beaufort'i skaala	Tuule		Tuule iseloom
	kiirus $v$ m/sek	surve $\frac{\rho v^2}{2}$ kg/m <sup>2</sup>	
0	0—0,5	0—0,0156	tuulevaikus
1	0,6—1,7	0,0225—0,11805	väga nõrk tuul
2	1,8—3,3	0,202—0,686	} nõrk tuul
3	3,4—5,2	0,696—1,685	
4	5,3—7,4	1,76—3,4	keskmise
5	7,5—9,8	3,51—6,00	värske
6	9,9—12,4	6,12—9,60	tugev
7	12,5—15,2	9,75—14,40	} väga tugev
8	15,3—18,3	14,6—20,6	
9	18,3—21,5	20,9—28,8	torm
10	21,6—25,1	29,2—39,4	} raju
11	25,2—29	29,7—52,6	
12	üle 29 <sup>1)</sup>	üle 52,6	

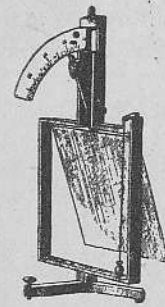
Tänapäeval mõõdetakse tuule kiirust nn. anemomeetritega. Anemomeetreid on mitmesuguse konstruktsiooniga. Uldjoonis võiksime nad jagada kahte liiki: liikuva ja liikumatu antenniga anemomeetrid. Seejuures nimetame antenniks tuule mõju vastuvõtvat osa anemomeetrist.

Levinud esimese liigi anemomeetreist võiks nimetada Wild'i pendelanemomeetrit (joon. 4) ja Robinson'i kausstuulik (joon. 5). Esimene neist peab tuulelipust tuule suunda juhitud olema, kuna viimane on tuule suunast sõltumatu.

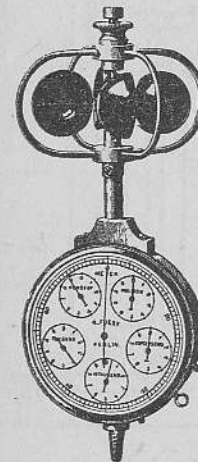
Liikumatu antenniga anemomeetreist on tuntumad Venturi (joon. 6) ja Pitot' (joon. 7) torud.

Tuule mõõtmiseks need torud ühendatakse mikromanomeetritega. Neist lihtsamat kujutab joon. 8, milles vedeliku pindade vahe määrab

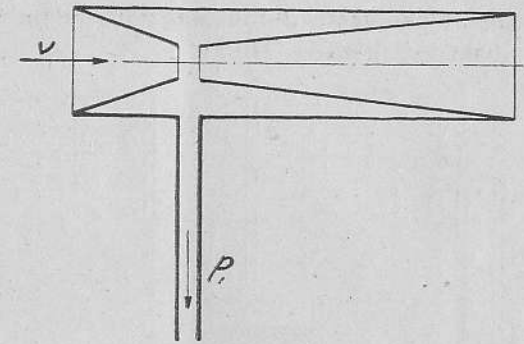
<sup>1)</sup> Suurimaks kiiruseks, mis maapinnal seni mõõdetud, on 54 m/sek. orkaani puhul Manilas Filipiinidel ja Mauritiuse saarel.



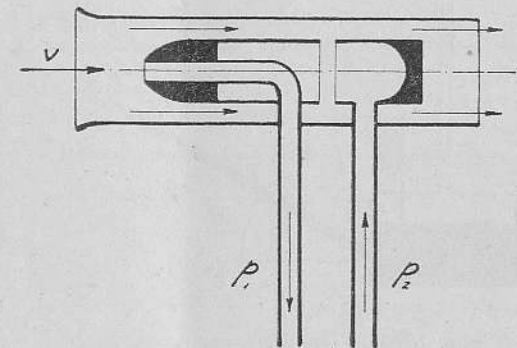
Joon. 4. Wild'i pendelanemomeeter.



Joon. 5. Robinsoni kausstuulik.



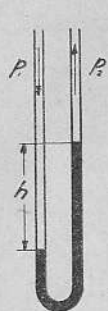
Joon. 6. Venturi toru läbilõikes.



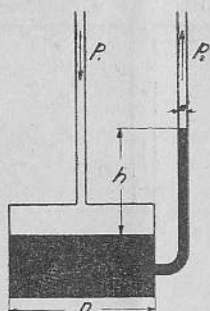
Joon. 7. Pitot' toru läbilõikes.

rõhumissamba kõrguse  $h$ . Rõhumissamba kõrguse  $h$  leidmine mõlema pinna kõrguse lugemisega ei ole praktiline, millest tingituna kasutatakse joon. 9 kujutatud mikromanomeetrit. Selle manomeetri üks vedelikupind on niivõrd suur  $\left(\frac{d}{D} < \frac{1}{20}\right)$ , et selle pinna kõrguse kõikumine on väga väike, nii et samba kõrguse  $h$  määramiseks piisab ainult peenema samba pinna asendi lugemisest vastaval

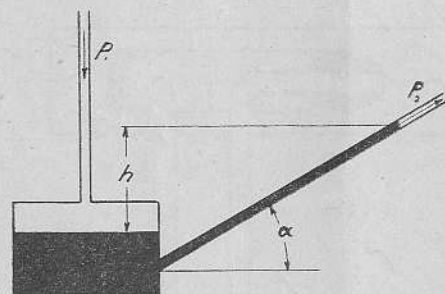
skaalal. Manomeetri tundlikkuse suurendamiseks antakse peenemale sambale kallak (joon. 10).



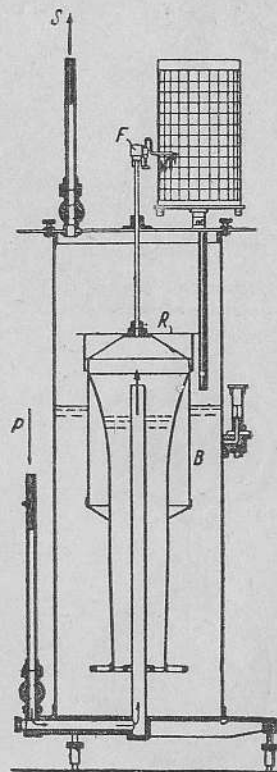
Joon. 8.



Joon. 9. Prandtl'i mikromanomeeter.



Joon. 10. Füssi mikromanomeeter.

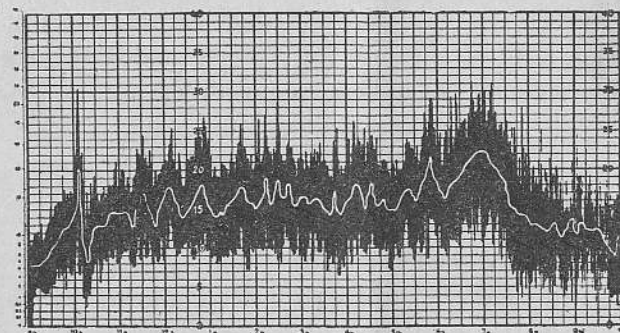


Joon. 11. Füssi universaal-anemograaf.

Tuulekiiruste pidevaks registreerimiseks kasutatakse anemomeetrit ühendatult registreerimisega. Seda aparati nimetatakse anemograafiks. Joon. 11 kujutab Füssi universaal-anemograafi. See töötab Pitot' toruga, mõjutab vedelikus üles-alla hõljuvat Dines'i kellukest, millega ühenduses olev varras joonestab pöörlevale trumlile tuulekiiruste joone.

Anemograafi, mis peale kiiruse registreerib ka tuule suunda, nimetatakse anemorumbograafiks.

Õhu liikumise kiirus on väga muutlik, mis avaldub ka anemograafi joonestatud anemogrammil (joon. 12).



Joon. 12. Anemogramm.

Tabel 2. Meetriline tuule skaala.

Kiirus m/sek.	Surve kg/m <sup>2</sup>	Tuule tugevuse nr.	Kiirus m/sek.	Surve kg/m <sup>2</sup>	Tuule tugevuse nr.	Kiirus m/sek.	Surve kg/m <sup>2</sup>	Tuule tugevuse nr.
1	0,1	0,2	18	26	6,7	35	98	10,4
2	0,4	0,5	19	29	7,0	36	104	10,6
3	0,8	0,8	20	32	7,2	37	110	10,8
4	1,3	1,0	21	36	7,5	38	116	11,0
5	2	1,3	22	39	7,8	39	122	11,2
6	3	1,6	23	43	8,0	40	128	11,4
7	4	2,0	24	46	8,2	41	135	11,6
8	5	2,5	25	50	8,4	42	141	11,8
9	7	3,0	26	54	8,6	43	148	12,0
10	8	3,5	27	59	8,8	44	155	12,2
11	10	4,0	28	63	9,0	45	162	12,4
12	12	4,3	29	68	9,2	46	170	12,6
13	14	4,7	30	72	9,4	47	177	12,8
14	16	5,0	31	77	9,6	48	185	13,0
15	18	5,5	32	82	9,8	49	192	13,2
16	21	6,0	33	87	10,0	50	200	13,4
17	23	6,3	34	93	10,2			



Kuna tuule-energia kasvab kiiruse kolmanda astmega, s. o. tuule kiiruse 2-kordseks kasvamisel kasvab energia 8-kordseks, siis tuulejõuseadmete arvutamisel peame aluseks võtma säärase keskmise tuulekiiruse, mis on vaatlustest saadud kiiruse kolmanda astme korrutis selle kiiruse esinemise sagedusega, saadud korrutiste summeerimisest, summa jagamisest vaatluste arvuga ja juurimisest:

$$v_k = \sqrt[3]{\frac{n_1 v_1^3 + n_2 v_2^3 + \dots + n_n v_n^3}{n_v}} \quad (1)$$

$v_k$  on otsitav keskmine tuulekiirus;  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  on üksikud mõõdetud kiirused ning  $n_v$  on vaatluste arv, kusjuures  $n_v = n_1 + n_2 + \dots + n_n$ ;  $n_1, n_2, n_n$  on üksikute kiiruste esinemise sagedused.

Kui näiteks ühe päeva jooksul vaatleja poolt mõõdetud tuulekiirused olid kell 7.00  $v_1 = 12$  m/sek.,  
 „ 13.00  $v_2 = 10$  m/sek.,  
 „ 21.00  $v_3 = 6$  m/sek.,

siis selle päeva keskmine tuulekiirus on

$$v_k = \sqrt[3]{\frac{12^3 + 10^3 + 6^3}{3}} \approx 10 \text{ m/sek.},$$

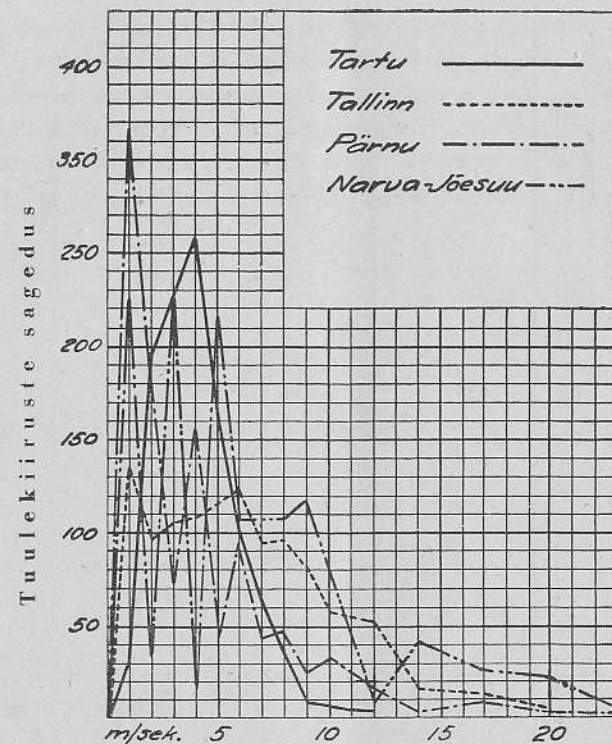
siinjuures  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 1$ ;  $n_3 = 1$ .

Sellekohased arvutused Eestis valitsevate tuulte kohta on teinud A. Kärnsna töös „Tuule-energia jaotusest Eestis“. Ilmunud Loodusvarade Instituudi kirjastusel.

Et tuulte kiirus aasta vältel väga vaheldub, siis ülevaate annab nende korduvus.

Vaadeldes tuulekiiruse andmeid Eestis 1933. aasta kohta, nähtub, et tuulte kiiruste sagedus teeb järsu languse 10–12 m/sek. juures. Sisemaal, Tartus, pole registreeritud 1933. a. vältel tuulekiirusi üle 12 m/sek. (joon. 13).

Joon. 13 toodud kõverjoontest selgub ka, et sisemaal tuulekiirus on ühtlasem, kuna mereäärsetes piirkondades tuulekiirus on suurem ja kõikumavam. Iseloomustavaks näiteks võiks veel tuua 1933. a. veebruarikuu andmed tuulekiiruste kohta (tabel 3).



Joon. 13.

### c. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest.

Suur-tuulejõujaamade kasutamisel tuleb arvesse peamiselt kõrgemate õhukihtide energia.

Näiteks Jaapanis 10 km kõrgusel on talve kestel keskmine tuulekiirus peaaegu püsivalt 75 m/sek. Maapinna lähedal piirdub aga keskmine tuulekiirus ainult kuni 10 m/sek. See nähtus on seletatav seega, et kõrgel õhu liikumine on vaba nendest takistustest, mis esinevad maapinnal (metsad, mäed jne.). Mida lähemale maapinnale, seda enam maapinna kuju ja iseloom mõjutavad tuulekiirust, millest on ka tingitud tuulekiiruste vahed mäeharjadel ja voortel.



Tabel 3.  
Tuulekiirused m/sek. 1933. a. veebruarikuu andmed.

Vaatusjaamad	Kell	K																											Kesktn.
		u p ä e v a d																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Tartu	7	2	6	5	4	7	2	4	1	7	6	6	3	7	2	2	2	2	2	2	5	1	2	7	5	3	2	2	3,5
	13	1	8	5	3	9	3	3	2	7	3	5	2	7	2	2	2	1	2	2	4	1	4	8	5	2	2	1	3,5
	21	3	7	4	6	5	3	2	3	9	5	5	3	3	2	2	1	2	1	3	3	2	5	7	4	3	2	1	3,5
Tallinn	7	4	1	4	9	1	1	4	1	6	3	1	2	3	9	5	2	2	0	5	2	1	3	8	2	5	1	2	5,1
	13	3	1	2	7	7	1	2	2	1	4	1	2	5	1	0	1	3	2	2	7	3	7	1	4	9	0	5,2	
	21	8	8	9	1	2	4	4	1	8	2	0	8	1	2	8	1	0	7	3	1	2	5	3	7	1	0	5	5,9
Pärnu	7	0	1	2	6	0	8	2	3	0	7	7	4	5	5	0	1	0	0	0	0	3	0	2	1	0	0	2,7	
	13	0	1	2	1	0	3	1	0	2	7	4	1	0	2	4	0	0	0	2	0	4	0	7	8	3	1	3,4	
	21	5	7	7	3	8	0	0	3	1	7	5	6	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	7	8	0	0	4	3,1
Narva-Jõesuu	7	6	8	1	1	0	6	0	5	0	5	1	2	8	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	3,6	
	13	5	8	5	8	1	2	3	6	1	1	0	3	1	0	1	1	1	1	1	1	3	0	1	1	0	5	4,5	
	21	5	8	3	6	5	5	1	0	1	4	8	3	1	1	0	3	0	1	0	1	3	0	5	1	7	0	3	3,5

Uldiselt liigub õhk kõrgemates kihtides, kuhu ei küüni maa-pinna konarused, suurema ning ühtlasema kiirusega. Näiteks ühtedel mõõtmistel Eiffeli tornis oli tuulekiirus 305 m kõrgusel 8,7 m/sek., kuna samal ajal 21 m kõrgusel oli ta ainult 2,1 m/sek. – seega neli korda väiksem.

Tuulekiiruse muutumine kõrgusega oleks Hellmanni järgi:

$$h = 0 \text{ kuni } 2 \text{ m } \frac{v}{v_0} = \sqrt[4]{\frac{h}{h_0}}$$

$$h = 2 \text{ kuni } 16 \text{ m } \frac{v}{v_0} = \sqrt[5]{\frac{h}{h_0}}$$

Sama teadlase järgi on tuule keskmist kiirust kõrgustel 16 ja 500 m vahel võimalik arvutada järgmise valemiga:

$$v = 2,7 \sqrt[5]{h}$$

Bilgrimi andmete järgi on tuule keskmine kiirus

$$v = \frac{2,97 + 0,38 h + 0,00122 \cdot h^2}{1 + 0,061 \cdot h + 0,00008 \cdot h^2}$$

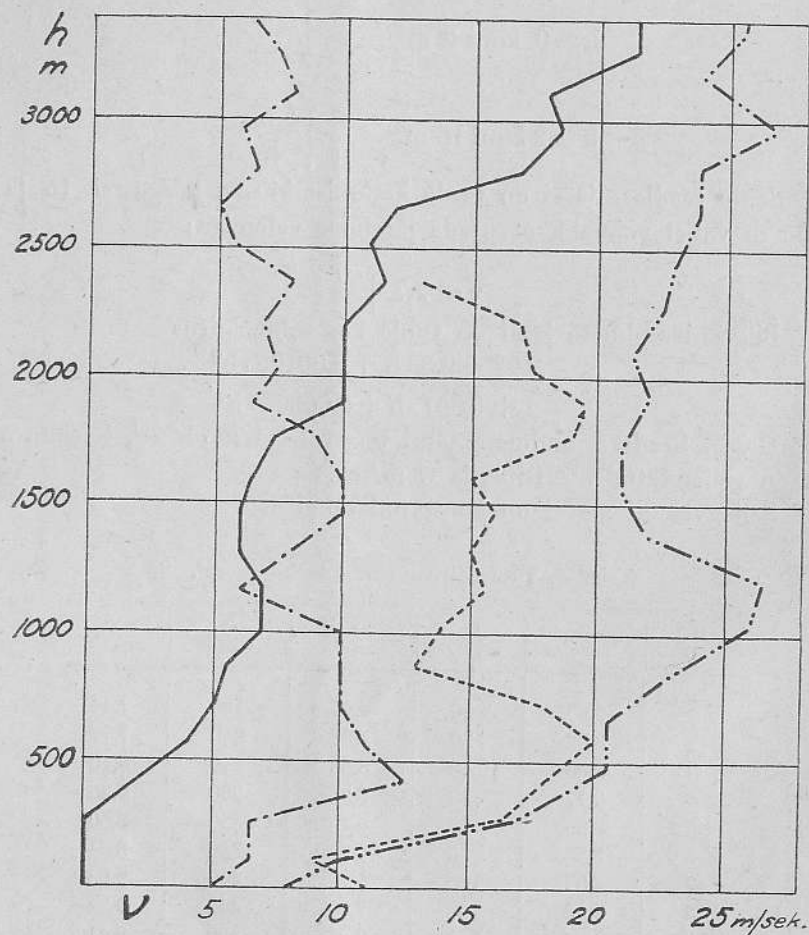
Dr. F. Brattke andmete järgi  $v = 1,2 + 1,79 \cdot h^{0,246}$ , kusjuures  $h$  on väljendatud meetrites ja  $v$  m/sek.

Selle valemi alusel on koostatud tabel 4.

Tabel 4. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest.

h m	v m/sek.	h m	v m/sek.	h m	v m/sek.
1	2,99	20	4,95	180	7,64
2	3,22	30	5,32	200	7,79
3	3,53	40	5,63	240	8,10
4	3,77	50	5,88	280	8,26
5	3,86	60	6,15	320	8,60
6	3,98	80	6,48	360	8,84
7	4,07	100	6,75	400	9,04
8	4,18	120	7,08	440	9,24
9	4,27	140	7,25	480	9,41
10	4,36	160	7,45		

Tabelis 4 märgitud kiirused vastavalt kõrgustele ei ole mõõdu-  
andvad kõigile piirkondadele, sest tuulekiirus on muutlik, see  
täheb kõiguv aastaegadel ja päevade jooksul. Tallinna Ülemiste  
Lennujaama pilootpallide vaatluste andmeist nähtub, et 1933. a.  
14. apr. (joon. 14 märgitud — joonega) kuni 300 m kõrguseni õhu-  
kihtide liikumist ei olnud. Kuid sellest piirist ülespoole kuni 3500 m

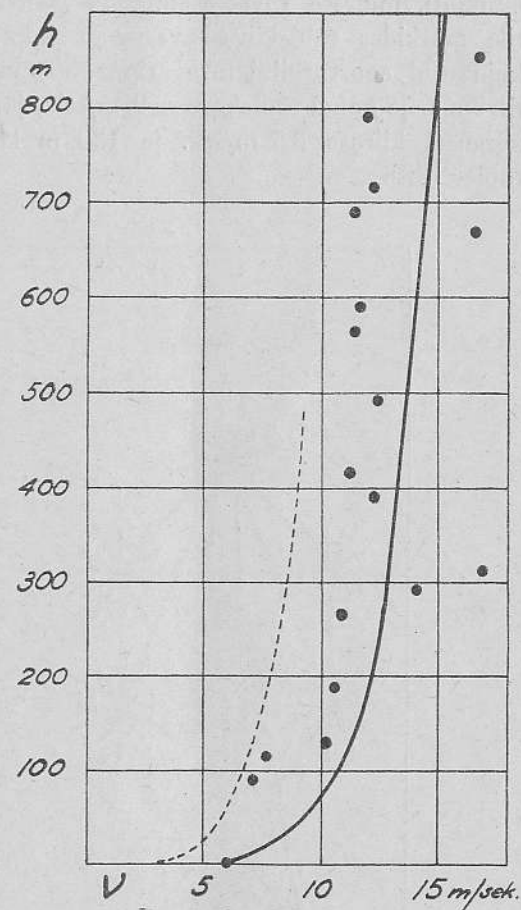


Joon. 14. Üksikvaatlused.

kõrguseni tuulekiirus kihtides oli suurenev astmeliselt, võttes kõr-  
gusega kiirust juurde 0 kuni 22 m/sek. Seevastu aga 9. veebruari  
mõõtmised (märgitud

— — joonega) näita-  
sid maapinnal 5 m/sek.  
(maapind asetseb 40 m  
üle merepinna), 400 m  
kõrgusel 12,5 m/sek.  
1000–1500 m vahel  
6–10 m/sek. ja kõrge-  
mal 5–8 m/sek. Neist  
andmeist nähtub, et  
tuulekiirust ülemistes  
õhukihtides ei ole või-  
malik otsustada maa-  
pinna lähedase õhuli-  
ikumise alusel vaatluse  
momendil, mida veel  
tõendavad joon. 14  
toodud kõverad mõõt-  
mistest 15. nov., mär-  
gitud — — — joonega,  
ja 24. jaan., märgitud  
— — — joonega.

Ülevaatlükuma pildi  
tuulekiirustest annab  
aasta keskmine. Nii on  
joon. 15 täppidega mär-  
gitud vastavalt kõrgus-  
tele tuule keskmised  
kiirused Tallinna Üle-  
miste Lennujaamas  
teostatud pilootpallide  
vaatluste andmetel 1938. a. kohta. Maapinnal keskmist tuulekiirust  
6 m/sek. aluseks võttes kujuneksid tuulekiirused sõltuvalt kõrgusest

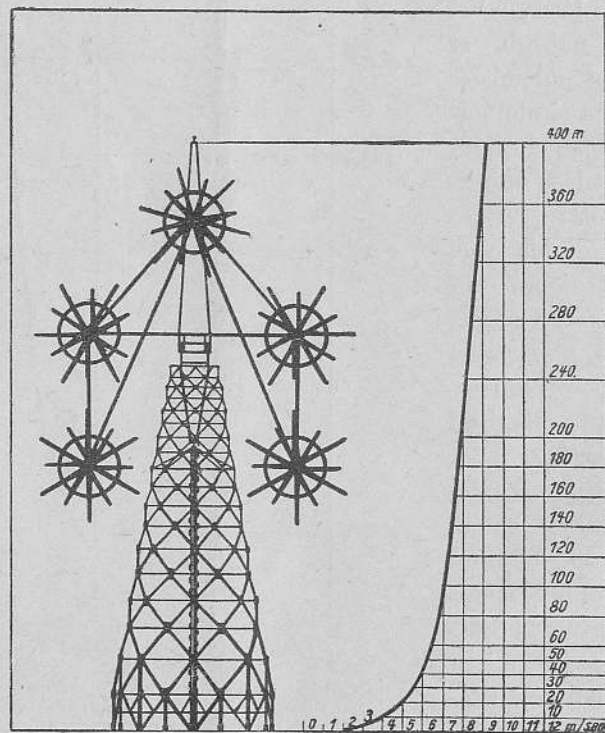


Joon. 15.  
Tuulekiirus eri kõrgustes 1938. a. kohta.



joon. 15. pideva joonena. Võrdluseks toome tab. 4 andmed katkend-joonega tõmmatuna.

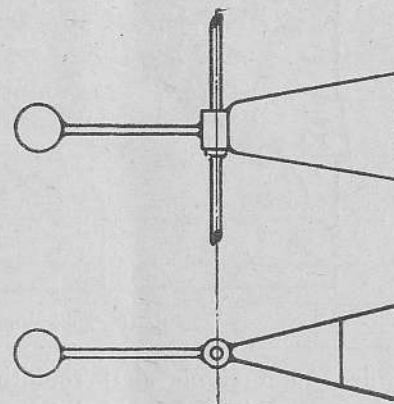
Sellepärast peab tuulejõumootorite projekteerimisel arvestama õhukihti, millesse tiivik asetatakse. Näiteks tuulejõujaama projektile märkides tuulekiirusi vastavalt kõrgustele saame joon. 16 kujutatud suurturbiini torni tipus 350 m kõrgusel asuva ülemise tiiviku telje kohal tuulekiiruse 9 m/sek., järgmise kahe ratta 270 m kõrgusel kiiruse 8,5 m/sek. ja 180 m kõrgusel asuval teljepaaril tuulekiiruse 8 m/sek.



Joon. 16.  
H. Honnefi tuuleturbiini kavand.

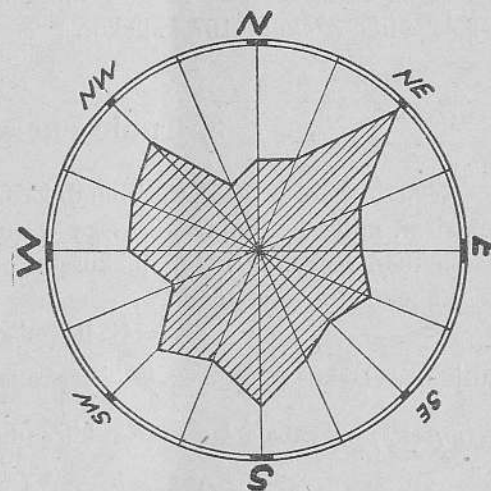
#### d. Tuule suund.

Tuule suund tähistatakse ilmakaarte alusel: S – W – N – E (lõuna, lääs, põhi, ida). Need ilmakaared poolitatuna annavad SW – NW – NE – SE (edel, loe, kirre, kagu) ja nende poolitamisel saaksime WSW – WNW – NNW – NNE – ENE – ESE – SSE – SSW. Tuule suund määratakse suunanäitajaga, milledest levinum on joon. 17 kujutatud nn. Wild'i tuulelipp. Uksikasjalisemaid andmeid Eestis valitsevate tuulte suundade kohta leiame K. Kirde töös „Andmed Eesti kliimast“, ilmunud 1939. a. Tartu Ülikooli Met.-obs. kirjastusel.



Joon. 17. Wild'i tuulelipp.

Ulevaate tuulesuundadest saaksime märkides tuule suundade sagedusi ilmakaartele, joonistades nn. tuuleroosi. Joon. 18 on näitena toodud Tallinnas 1933. a. mõõdetud tuulesuundade tuuleroos. Sellest nähtub, et 1933. a. oli kõige rohkem NE-, seejärel S-, siis NW-tuuli jne. Kõige vähem oli NNW- ja üldisemalt põhjatuuli.



Joon. 18. Tuuleroos.

Tuulesuuna muutlikkusest tingituna peab tuulemootori tiibratas olema suuteline pöörduma igasse ilmakaarde, seepärast tiibratta mehhanism asetatakse vabalt pöörlevale alusele.





Joon. 19. Tuulesuunad Eestis.

Tuule suund ei ole alati rööbiti maapinnaga, sest maapinna ebatasasused põhjustavad mõnikord tuule suuna muutumist, sellepärast on tavaliselt ette nähtud võimalus tuulemootorite tiibratta teljele anda  $3^\circ$  kuni  $10^\circ$  kallakut.

### 3. Tuule-energia.

Nagu eespool tähendatud, omab ka õhk raskust  $G$  (kg), s. o. ka massi  $m$ , mille liikumine kiirusega  $v$  (m/sek.) on suuteline arendama tööd teekonna  $h$  (m) pikkusel.

Väljendades seda tööd

$$A = G \cdot h \quad (\text{mkg}) \quad (2),$$

kusjuures raskus  $G = m \cdot g$  (kg), teekonna pikkus  $h = \frac{v^2}{2g}$  (m) ja

$g$  (m/sek.<sup>2</sup>) on vabalt langemise kiirendus. Edasi võib väljendada

$$A = G \cdot h = g \cdot m \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3).$$

Kui õhu raskust väljendada  $G = Q \cdot \gamma$ , kus  $Q$  = keha maht (m<sup>3</sup>)

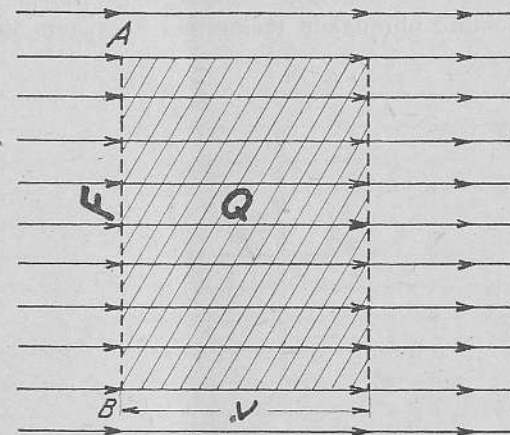
ja massi tihedus  $\rho = \frac{\gamma}{g} \left( \frac{\text{kg} \cdot \text{sek.}^2}{\text{m}^4} \right),$

siis

$$A = G \cdot h = Q \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} = Q \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{mkg}) \quad (4).$$

Paneme näiteks joon. 20 toodud joonega AB kujutatud avast liikuvasse õhukihti, siis ühe sekundi vältel sellest avast läbivoolava õhu maht  $Q = F \cdot v$ , kus  $F$  = ava pind ja  $v$  = tuule kiirus. Sellest avast läbivoolava õhuhulga võimsus.

$$E = Q \frac{\rho \cdot v^2}{2} = F \cdot v \frac{\rho \cdot v^2}{2} = F \frac{\rho \cdot v^3}{2} \quad (\text{mkg/sek.}) \quad (5).$$



Joon. 20.

Et õhuhulga võimsus on arvusuuruselt võrdne sekundilise vooluhulga energiaga, siis nimetatakse edaspidises käsitluses suurust  $E$  ka tuule-energiaks, õhuliikumise-energiaks jne.

#### a. Tuule surve paigalseisvale pinnale.

Väljendades võimsust  $E = P \cdot v$ , s. o. jõud korrutatud kiirusega, siis valemi 5 alusel jõud

$$P = \frac{E}{v} = F \frac{\rho \cdot v^3}{v \cdot 2} = F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (6).$$

Võttes aluseks õhu mahukaalu  $\gamma = 1,226$  kg/m<sup>3</sup> ja kiirendust  $g = 9,81$  m/sek.<sup>2</sup>, mille suhe on õhutihedus

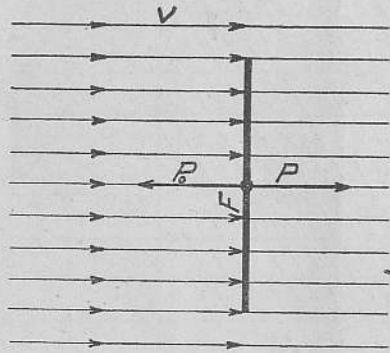
$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1,226}{9,81} = 0,125,$$

siis jõud  $P = F \frac{0,125 \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot F \cdot v^2 \quad (\text{kg}) \quad (7)$

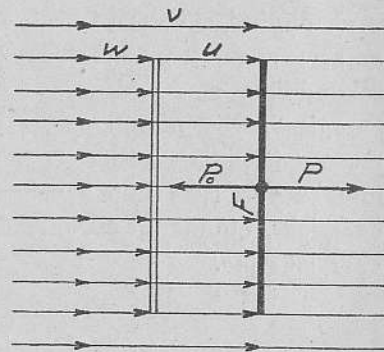
ja tuule surve pinnaühikule

$$\frac{P}{F} = 0,063 \cdot v^2 \quad \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$$

Tegelikkuses on tuule surve suurus teistsugune, sest üksikud õhujoad põrkavad etteseatud takistuse vastu mitte tuule liikumise suunas, vaid eseme ette tekkiva „õhukuhjumise” tõttu muudavad oma suunda eseme ees. Peale selle eseme taga õhujoad ei liibu mitte eseme pinna külge, vaid inertsil mõjul valivad teistsuguse teekonna. Seetõttu eseme taga tekib õhutühjus, mis omakorda põhjustab õhukeerise tekkimist eseme tagapoolel. Joon. 21 ja 21a on toodud õhujagade teekonnad keeristeta, mis ei vasta tegelikkusele.



Joon. 21.



Joon. 21-a.

Eeltähendatud põhjustel tegelikult rakendatud jõud  $P_0 \cong P$  ja suhe

$$\frac{P_0}{P} = c_x \quad (8).$$

See on katseliselt määratav ja nimetatakse takistusteguriks, mille kohta arvulised andmed on toodud tab. 5. See arv oleneb eseme kujust, tema pinna karedusest ja eseme asetusest õhuliikumise suuna suhtes.

Täiendades valemit (7) takistusteguriga, saaksime tuule rakendatud jõu

$$P_0 = c_x \cdot F \frac{0,125 \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot c_x \cdot F \cdot v^2 = \frac{1}{16} c_x \cdot F \cdot v^2 \quad (9).$$

Tabelis 2 on toodud andmed tuule surve kohta risti asetatud lamedale pinnale, mis on arvutatud valemi järgi

$$P_0 = \frac{1}{16} c_x F v^2 = \frac{1}{16} \cdot F v^2 = 0,08 \cdot F \cdot v^2,$$

kus  $P_0$  = rakendatud jõud kg,  $F$  = pindala, millele tuul avaldab survet,  $c_x$  = takistustegur (tab. 5 nr. 1).

### b. Tuule surve liikuvale pinnale.

Kui pind liigub tuule mõjul tuule suunas kiirusega  $u$ , siis pinnale rakendatud võimsus on

$$E_0 = P_0 \cdot u \quad (10)$$

ja pinnale mõjuva õhumassi kiirus (joon. 22)

$$w = v - u \quad (11).$$

Sellest sõltuvalt valem 9 alusel rakendatud jõud

$$P_0 = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2} = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot (v - u)^2}{2} \quad (12)$$

ja pinnale rakendatud õhu liikumisenergia (rakendatud võimsus) (v. 5)

$$E_0 = P_0 \cdot u = c_x \cdot F \frac{\rho (v - u)^2 u}{2} = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2 \cdot u}{2} \quad (13),$$

millest nähtub, et valemi 5 järgi arvutatud tuule-energia on ainult osaliselt kasutatud, mille suhet võime kirjutada

$$\eta = \frac{E_0}{E} = \frac{P_0 \cdot u}{F \frac{\rho \cdot v^3}{2}} = \frac{c_x \cdot F \frac{\rho \cdot (v - u)^2 \cdot u}{2}}{F \frac{\rho \cdot v^3}{2}} = c_x \cdot (v - u)^2 \frac{u}{v^3} \quad (14)$$

ja koondatult

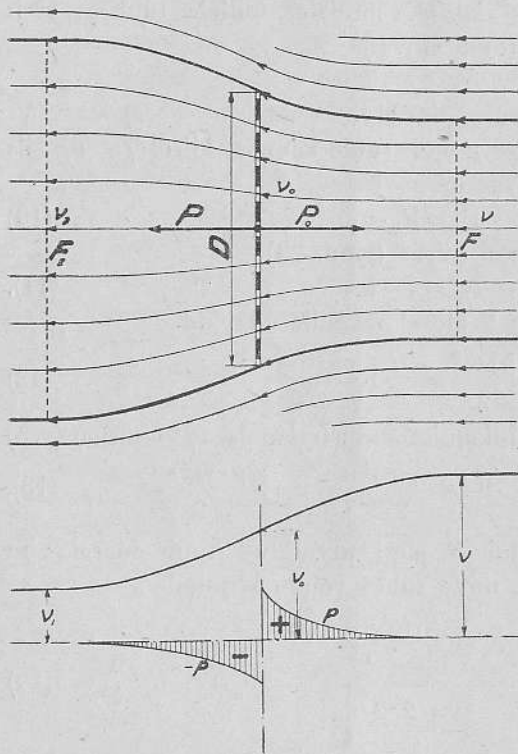
$$\eta = c_x \left( 1 - \frac{u}{v} \right)^2 \frac{u}{v} \quad (15).$$

Seda suhet nimetatakse tuule võimsuse ehk energia kasuteguriks. Kui  $u = v$ , see tähendab, et pind liigub tuulega ühises suunas ja võrdse kiirusega, siis  $\eta = 0$ , see tähendab, et tuul ei avalda pinnale mingit mõju. Samuti on loomulikult  $\eta = 0$ , kui  $u = 0$  s. t. kui pind seisab paigal.



### c. Pinnast läbivoolava õhu liikumisenergia.

Kui eespool käsitletavad pinnad olid täiesti kinnised, siis käesoleval juhul valime kettakujulise võre, millest juhime õhku läbi. Olenevalt pinna (võre) kujust õhk voolaks pinnast läbi kiirust aeg-



Joon. 22 ja 23.

lustavalt, mille tagajärjel algkiirusega voolava õhujoa põiklõige liikumise kiiruse vähenemisel paisub suuremaks. Seejuures alg- ja lõppkiiruste vahel on sõltuv pinnale üleantud õhumassi kineetiline (liikumis-) energia.

Kujutades tuuleturbiini tiivikut pöörleva kettakujulise võreana, millele voolab õhk algkiirusega  $v$  ja sealt lahkub lõppkiirusega  $v_1$ , siis pinnale voolava õhu kiirus  $v_0$  on alg- ja lõppkiiruste vahepealne, kusjuures sekundi vältel pinnale voolava õhu hulk

$$Q = F_0 \cdot v_0 \text{ (m}^3\text{/sek.)}$$

Selle õhuhulga läbivoolamiseks on vajalikud, vastavalt alg- ja lõppkiirustele, õhujoa põiklõikepinnad

$$F \cdot v = F_1 \cdot v_1 = Q,$$

nagu seda kujutab tiibratta pinnale voolava õhu spekter (joon. 22).

Ülaltoodud põhjustel voolab õhk tiivikusse ja tiivikust välja väheneva kiirusega, kusjuures esineb rõhumuutus, mis on näidatud üldjoontes joonisel 23.

Eeltoodust tuleb järeldada, et tiivikusse voolava õhu kiirus on vahepealne ja tõenäoliselt  $v_0 = \frac{v + v_1}{2}$ , kusjuures  $v_0$  ei ole ühtlane

kogu pinnal, vaid arvutatav keskmine.

Kui ühe sekundi vältel läbivoolava õhu mass

$$m = \rho \cdot F_0 \cdot v_0 = \rho \cdot F_0 \cdot \frac{(v + v_1)}{2} \quad (17),$$

ning pinnale üleantud õhumassi kineetilise energia

$$E_0 = \frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} = \frac{m}{2} (v^2 - v_1^2)$$

ja arvutades massi valemi 17 alusel saame

$$E_0 = \rho \cdot F_0 \cdot \frac{(v + v_1)}{2} \cdot \frac{1}{2} (v^2 - v_1^2) = \frac{1}{4} \rho \cdot F_0 \cdot (v + v_1) (v^2 - v_1^2) \quad (18)$$

ja valemiga 5 arvutatud  $E$  suhe määrab tuule-energia kasutatavuse koefitsiendi ehk nn. kasuteguri

$$\eta = \frac{E_0}{E} = \frac{\frac{1}{4} \rho \cdot F_0 \cdot (v + v_1) (v^2 - v_1^2)}{\frac{1}{2} \rho \cdot F_0 \cdot v^3} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{v_1}{v} \right] \quad (19).$$

Sel kasuteguril või tuule-energia kasutamise võimalusel on piir, mille määrab prof. A. Betzi väitel kiiruste suhe  $\frac{v_1}{v} = \frac{1}{3}$ , mida aluseks võttes saaksime kasuteguri  $\eta_{\text{maks.}} \cong 0,60$ , kuid prof. G. Sabinini

väitel, arvutades valemiga  $\eta = 4 \frac{v_1 \left( 1 - \frac{v_1}{v} \right)}{v \left( 1 + \frac{v_1}{v} \right)}$ , see vahekord on

$$\frac{1}{2,5} \text{ ja } \eta_{\text{maks.}} = 0,69.$$



Näide 1.

Tabelites toodud arvude selgitamiseks võtame pinna suurusega  $F = a \cdot b = 1,26 \cdot 12,6 = 16,0 \text{ m}^2$  ja tuule-kiirusega  $40 \text{ m/sek}$ . Sel puhul tuule jõud valemite 6 ja 7 alusel oleks:

$$P = F \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,063 \cdot F \cdot v^2 = 0,063 \cdot 16,0 \cdot 40^2 = 1600 \text{ kg}.$$

Kuna oluline on veel pinna kuju, mis iseloomustatakse teguriga  $c_x$  (v. 8), siis käesoleval juhul tab. 5 nr. 1 toodud pindadele, suhte  $\frac{a}{b} = \frac{12,6}{1,26} = 10$  juures tegur  $c_x = 1,29$ , siis pinnale üleantud jõud valemi 9 põhjal on  $P_o = 1,29 \cdot 1600 = 2050 \text{ kg}$ , mis annab rõhumise pinnaühikule  $\frac{P_o}{F} = \frac{2050}{16} = 128 \text{ kg/m}^2$ . See arv võrdub tab. 2 toodud arvuga, milles  $\frac{\rho \cdot c_x}{2} = 0,08$  ja  $\frac{P_o}{F} = 0,08 \cdot v^2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ .

Näide 2.

Kui aga sama pind  $F = 16 \text{ m}^2$  tuule mõjul liigub tuule suunas kiirusega  $u = 15 \text{ m/sek}$ . (joon. 22), siis õhu relatiivne liikumiskiirus valemi 11 alusel on  $w = v - u = 40 - 15 = 25 \text{ m/sek}$ ., ja arvutades teguriga  $c_x$ , saame pinnale üleantud jõu (v. 12)

$$P_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 0,08 \cdot F \cdot w^2 = 0,08 \cdot 16 \cdot 25^2 = 800 \text{ kg}, \text{ kus } \frac{c_x \cdot \rho}{2} = 0,08 \text{ ehk võimsuse (v. 13)}$$

$$E_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2 \cdot u}{2} = 0,08 \cdot F \cdot w^2 \cdot u = 0,08 \cdot 16 \cdot 25^2 \cdot 15 = 12000 \text{ mkg/sek.}, \text{ samuti } E_o = P_o \cdot u = 800 \cdot 15 = 12000 \text{ mkg/sek.}$$

Kui liikuva õhumassi energia (v. 5)

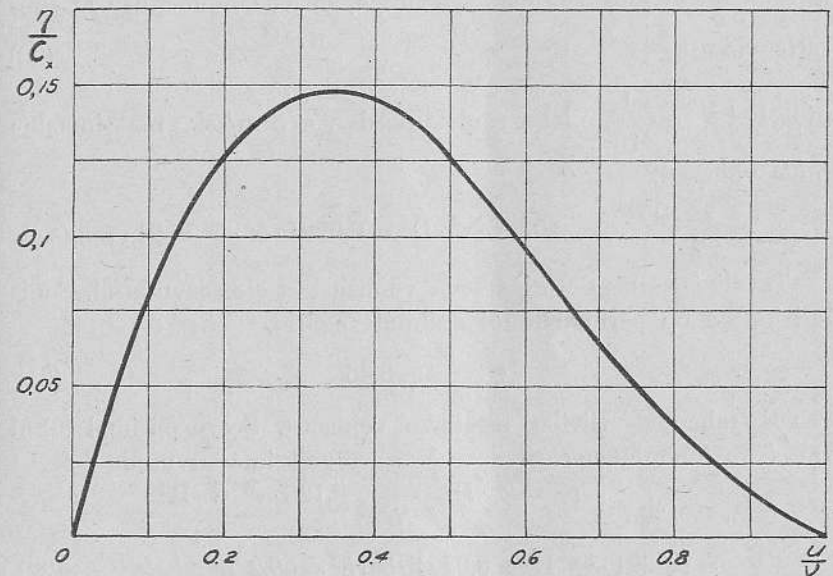
$$E = F \frac{\rho \cdot v^3}{2} = \frac{0,125 \cdot 16 \cdot 40^3}{2} = 64000 \text{ mkg/sek.},$$

$$\text{siis kasutegur } \eta = \frac{E_o}{E} = \frac{12000}{64000} = 0,189.$$

Seda kasutegurit arvutades valemi 15 alusel, saaksime

$$\eta = \frac{E_o}{E} = c_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v} = 1,29 (1 - 0,375)^2 \cdot 0,375 = 0,189.$$

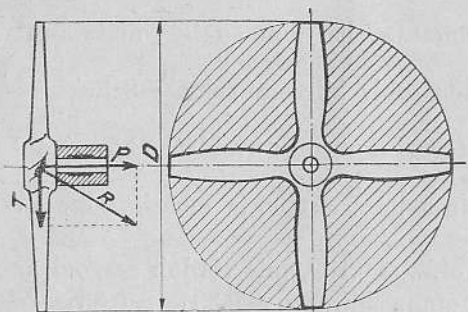
Kuna  $c_x$  on katseliselt määratav, siis tuule-energia maksimaalseks kasutamiseks tuleks valida sobiv kiiruste suhe  $\frac{u}{v}$ . Selleks võtame vaatlusele joon. 24 kasuteguri muutmist avaldavat kõverjoont, mille haritäpile vastav kiiruste suhe  $\frac{u}{v} = 0,33$  ja maksimaalne kasutegur  $\eta = 0,147 \cdot c_x = 0,147 \cdot 1,29 = 0,189$ , mis võrdub eespool arvatud arvuga põhjusel, et pinna kiirus  $u = 0,33 \cdot v = 0,33 \cdot 40 = 13,2 \text{ m/sek}$ ., mis näites toodud kiirusele ( $u = 15 \text{ m/sek}$ .) on sedavõrd lähedane, et see kasutegurit ei mõjuta.



Joon. 24.

Näide 3.

Kolmanda näitena toome tiiviku läbimõõduga  $D = 5 \text{ m}$ , mille neli tiiba on küllaldased tiirlemispinnast  $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$  läbivoolava õhu liikumisenergia maksimaalseks haaramiseks (joon. 25):



Joon. 25.

Kui kiiruste suhte  $\frac{v_1}{v} = \frac{1}{3}$

juures on tuule-energia kasutegur valemi 19 alusel

$$\eta_{\text{maks.}} = \frac{E_o}{E} = \frac{16}{27} \sim 0,6$$

kõige suurem, siis käsitles valemis 5 toodud tuule võimsuse väljendust

$$E = F \frac{\rho \cdot v^3}{2}$$

ja seda täiendades eeltoodud teguriga, oleks läbimõõduga  $D$  tiibratta võimsus

$$E_{\text{maks.}} = \frac{16}{27} \frac{\rho \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (20)$$

ning, kui  $\frac{\rho}{2} \sim \frac{1}{16}$ , oleks tuulekiirusel  $v = 5$  m/sek. maksimaalne tuule võimsus

$$E_{\text{maks.}} = \frac{v^3}{27} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0291 \cdot 5^3 \cdot 5^2 = 91 \text{ mkg/sek.}$$

Tavalise tuulemootoriga seda võimsust ei ole saavutatud. Senised katsed on parimal juhul andnud teguri

$$\eta = \frac{E_n}{E} \cong 0,45 \quad (21)$$

kus  $E_n$  tähendab tiiviku tegelikku võimsust. Seega parimal juhul  $D = 5$  m läbimõõduga tiiviku võimsust võiksime arvutada

$$\begin{aligned} E_n &= \eta \cdot E = \eta \frac{\rho \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,45 \frac{0,125 \cdot v^3}{2} \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \\ &= 0,0221 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0221 \cdot 5^3 \cdot 5^2 = 69,2 \text{ mkg/sek.} \end{aligned} \quad (22)$$

Väljendades seda võimsust hobujõududes, saaksime

$$N_h = \frac{69,2}{75} = 0,92 \text{ hobujõudu}$$

(üks hobujõud = 75 mkg/sek.) või kilovattides

$$N_k = \frac{69,2}{102} = 0,68 \text{ kilovatti (üks kilovatt = 102 mkg/sek.).}$$

Tabel 5.

Takistustegurid  $c_x$  erinevatele kehadele.

Järj-nr.	Keha kuju	Pind	Kuju vahekorrad	$c_x$
1		$a \cdot b$	1	1,10
			$\frac{b}{a} = 4$	1,19
			10	1,29
			$\infty$	2,01
2		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	1,11
3		$d \cdot l$	1	0,63
			$\frac{l}{d} = 5$	0,74
			40	0,98
			$\infty$	1,20
4		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,47
5		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,34
6		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	1,33
7		$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{l}{d} \sim 6$	0,05
8		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,22

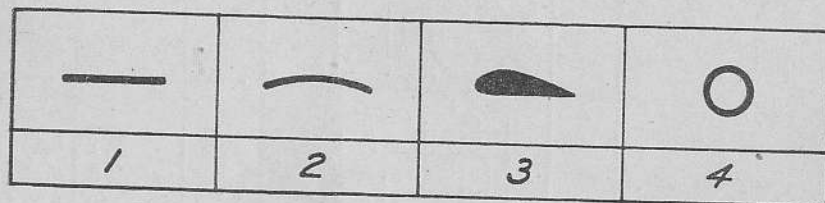


#### 4. Tuulemootori tiivik.

##### a. Tiiva kuju.

Tuule-energia rakendamisel mehaanilisele tööle tuleks võimalikult suurel hulgal rakendada õhu liikumise energiat. Selleks peab valima võimalikult väikese takistusega tiiva, s. o. tiiva pind olgu sile ja põiklõikepind (profiil) võimaldagu tiiva õhust läbitungimist vähese takistusega.

Tarvitatavaid tiivaprofileid kujutab joon. 26. Lame profiil (1) on seepärast halvema õhu ümbervoolavusega kui kaarekujuline (2), et võimaldab rohkem õhukeeriste tekkimist.



Joon. 26. Tiivaprofiilid.

Parima õhu ümbervoolavusega on nn. aerodünaamiline profiil (3), mida kasutatakse kiiresti tiirlevate tiivikute puhul. Selgituseks on toodud (joon. 27) pöörise profiili ja (joon. 28) aerodünaamilise profiili spektrid.

Nagu joon. 27 nähtub, tekib lameda profiiliga (1) pindadel rohkesti õhukeeriseid, mis püsivad enam-vähem igasuguse pinna kohtumisnurga  $\alpha$  suuruse puhul; kuna aerodünaamilise profiiliga (3) pindadel keeriseid esineb väiksemal arvil ja väiksemate kohtumisnurkade puhul puuduvad nad peaaegu täiesti.

Et pinna asetamisel tuulde on rakendatud jõud (v. 9)

$$P_o = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

siis selle suurus sõltub pinna profiilist ja kohtumisnurgast  $\alpha$  (joon. 29).

Seades joon. 26 kuju I pinna tuulde kohtumisnurgaga  $\alpha$ , koosneb jõud  $P_o$  komponentidest  $P_x$  ja  $P_y$ , milledest

$$P_y = c_y \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (23)$$

nimetatakse tõstejõuks

$$\text{ja } P_x = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (24)$$

takistusjõuks. Ühtlasi nimetatakse tegurit  $c_y$  tõstejõu- ja  $c_x$  takistus- teguriks, millede suhe

$$\epsilon = \frac{c_x}{c_y} \quad (25)$$

on tiiva  $\bar{c}$  profiili iseloomustajaks ja nimetatakse lauglemisteguriks.

Jõud  $P_o$  on tõste- ja takistusjõu resulteeriv jõud, mis on

$$P_o = \sqrt{P_y^2 + P_x^2},$$

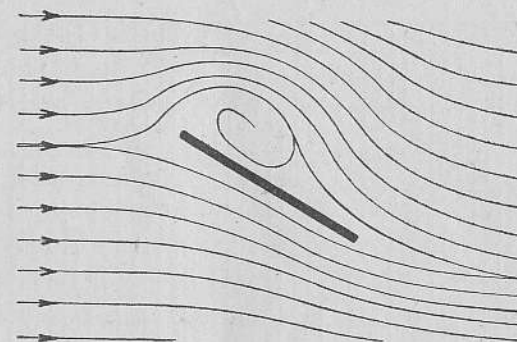
$$\text{või } P_o = c_o \cdot F \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

kui tegur

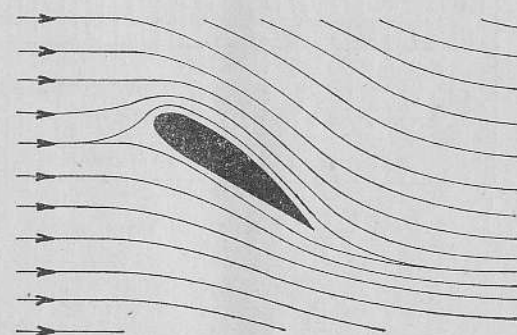
$$c_o = \sqrt{c_y^2 + c_x^2},$$

kusjuures mõlemad tegurid  $c_y$  ja  $c_x$  olenevad profiilist, kohtumisnurgast  $\alpha$  ja pinna karedusest.

Joon. 30 - 32 on tuulemootorite ehitusel kasutatavate siledate profiilide katseliselt

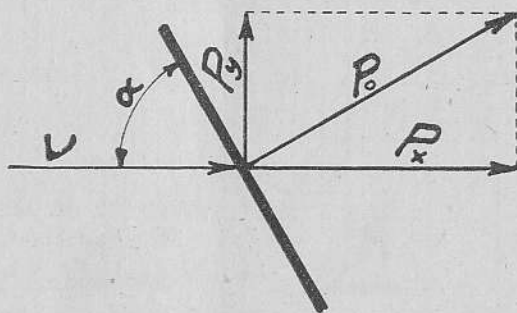


Joon. 27.



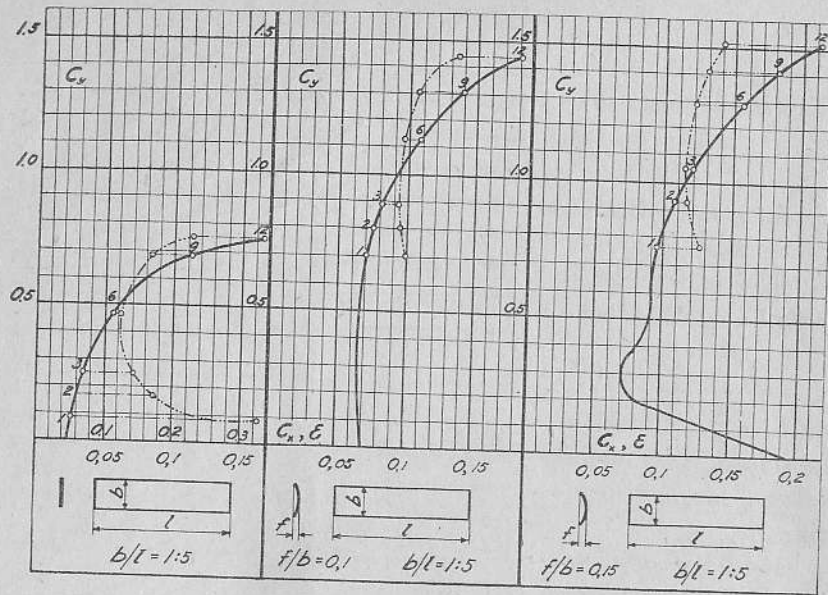
Joon. 28.

Õhuliikumise spektrid.



Joon. 29.

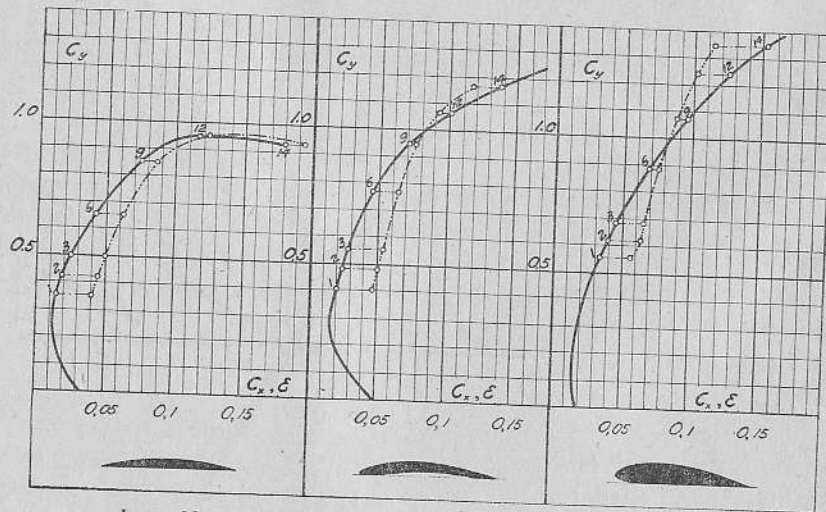




Joon. 30.

Joon. 31.

Joon. 32.



Joon. 33.

Joon. 34.

Joon. 35.

määratud tegurid, vastavalt kohtumisnurgale  $\alpha$ . Pideva joonega on märgitud tegurid  $c_x$  ja  $c_y$ . Kohtumisnurga suurused on märgitud kõver-

joone juurde kraadides. Tegurite suhte  $\frac{c_x}{c_y}$  suu-

rused või nn. lauglemistegurid  $\mathcal{E}$  (valem 25) on märgitud - - - - - joonega. Profili aero-dünaamilise paremus otsustab  $\mathcal{E}$  suurus: mida väiksem on  $\mathcal{E}$ , seda suurem on tiiviku kasu-tegur.

Et kohtumisnurgad tiiva rummu lähedal on suuremad kui tiiva otstes, valitakse ka vajaduse puhul tiivale mitu profiili pideva üleminekuga. Võrreldes kolme profiili (joon. 33-35), nähtub, et neist 1° kohtumisnurga puhul omab vähima  $\mathcal{E}$  joon. 33 profiil ja 14° nurga puhul omab vähima  $\mathcal{E}$  joon. 35 profiil. Seega joon. 33 profiil oleks, olenevalt tiiviku konstruktsioonist, sobiv tiiva otstepoolsele osale kuni 6° kohtumisnurgaga, kuna joon. 35 profiil sobiks rumpupoolsele osale, kus suuremate kohtumisnurkade juures  $\mathcal{E}$  on väiksem.

Tegurid  $c_y$  ja  $c_x$ , nagu eespool tähendatud, määratakse katseliselt ja olenevad profiilist ning kohtumisnurgast.

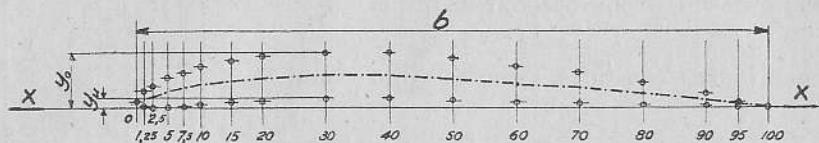
Näiteks joon. 34 ja 35 profiili moodud on antud tabel 6.

Tabel 6 toodud mõõtude käsitlemise näiteks võtame joon. 34 profiili, mille laius on  $b$  (joon. 36). Profiili piirjoone punktide abstsissid on tabelis 6 antud profiili laiuse  $b$  protsentides. Profiili ülemise pinna ordinaadid

Tabel nr. 6

x	y																	
	0	1,25	2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100	
Joon. 34	$y^o$	0,75	2,45	3,20	4,45	5,45	6,20	7,30	8,05	8,60	8,55	7,85	6,90	5,55	3,85	2,05	1,10	0,00
	$y_u$	0,75	0,10	0,05	0,00	0,15	0,40	0,85	1,20	1,60	1,65	1,50	1,20	0,75	0,45	0,15	0,05	0,00
Joon. 35	$y_o$	4,00	7,15	8,50	10,40	11,75	12,85	14,35	15,30	16,00	15,40	14,05	12,00	9,50	6,60	3,55	2,00	0,50
	$y_u$	4,00	2,25	1,65	0,95	0,60	0,40	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

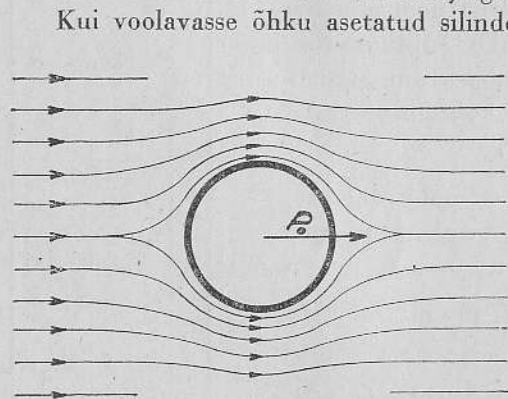
on märgitud  $y_0 = ga$  ja alumise pinna ordinaadid  $y_u = ga$  (vt. joon. 36).



Joon. 36.

Ringikujulise profiiliga (joon. 26-4) tiib kujutab endast Fletneri rootorit, s. o. telje ümber pöörlevat silindrit. Fletneri rootor tuulemootori tiivana (joon. 96) on vähe kasutamist leidnud ja katsetamisel andnud jõudude suhte  $\frac{P_y}{P_x} = 7$ , kuna aerodünaamiliselt parimad profiilid annavad 3 korda suurema, s. o.  $\frac{P_y}{P_x} = 22$ .

Rootori tööiseloom on lühidalt järgmine.

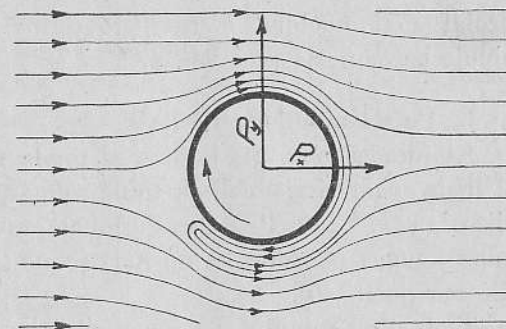


Joon. 37.

Kui voolavasse õhku asetatud silinder ei tiirle, siis õhk voolab võrdse kiirusega mõlemal pool silindrit. Ka jõud on sealjuures mõlemal küljel võrdsed ja jõu  $P_0$  suund on samane õhu liikumise suunaga (joonis 37).

Kui aga sama silinder oma telje ümber tiirleb, siis õhukihid silindri pinna ümber tiirlevad kaasa. Sellel

rõhk väheneb. Teisel silindri küljel tiirlevad õhukihid vastassuunas õhuvoolule, mis tingib seal rõhumise suurenemise. Neilt mõlemalt silindri poolelt avalduvad surved annavad jõu  $P_y$ , mille mõjul silinder liigub õhu voolamise sihile põiki (joonis 38).

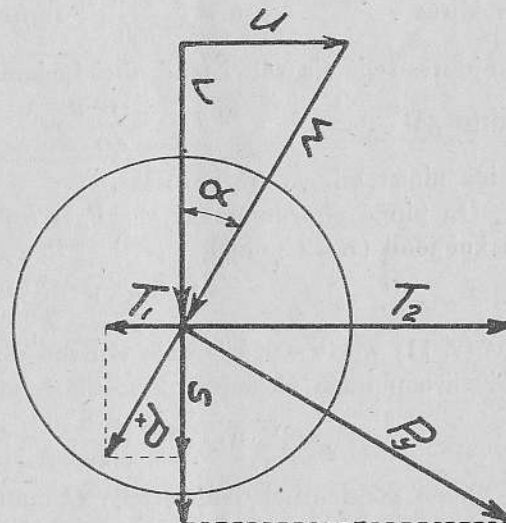


Joon. 38.

Liigub aga pöörlev silinder põiki tuult kiirusega  $u$ , siis tungjooned  $P_x$  ja  $P_y$  jagunevad joonisel 39 kujutatud komponentideks, kusjuures silindri liikumisjõud  $T$  on komponentide  $T_1$  ja  $T_2$  summa (vt. ka v. 52).

Kohtumismurk  $\alpha$  on sõltuv õhu voolamise kiiruse  $v$  ja silindri liikumise kiiruse  $u$  suuruste suhtest. Seega silindri kiiruse  $u$  suurenemisega, kui õhu voolamise kiirus  $v$  püsib, suureneb kohtumismurk  $\alpha$ , kuid silindri liikumise jõud  $T$  väheneb. Sellest järeldub, et maksimaalse kasuteguri annab väiksem kohtumismurk, mispärast silindri liikumise kiirus peab olema väike.

Eeltoodu põhjal joon. 26 toodud profiile 1 ja 2 tarvitatakse aeglaselt ja profiili 3 kiiresti jooksvate tiivikute ehitamisel, ning



Joon. 39.



profiil 4 on mõeldud Fletneri rootorina, mida seni on kasutatud ainult laeva purje asendajana.

### b. Vertikaalteljega tiivik.

Kinnitades joon. 21a kujutatud pinda kodaraga teljele, siis pind ei liigu enam sirgjooneliselt tuule suunas, vaid pöörleb ümber telje kiirusega  $u$ . Jõu  $P_0$  rakenduspunkt asub pinna raskuspunktis, mille kaugus pöördteljest on  $r$ , ja joonestab pöörlemisel ringikujulise tee (joon. 40).

Teeb pind minutis  $n$  pööret, siis pinna raskuspunkti teekonna pikkus on

$$s = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n \quad (\text{m}) \quad (26)$$

ja kiirus

$$u = \frac{2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{m/sek.}) \quad (27),$$

kusjuures selle aja vältel pind ühes kodaraga muudab oma asendit

kiirusega

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{u}{r} \quad (28),$$

mida nimetatakse nurk-kiiruseks.

On pinna pöördmoment  $M = P_0 \cdot r$  (mkg) (29) ja kui jõud (v. 12 põhjal)

$$P_0 = c_x \cdot F \frac{\rho \cdot w^2}{2},$$

kus (v. 11)  $w = v - u$ , siis selle jõu töö ühe sekundi vältel (v. 10) või tiiva pinnale ülekantud kineetiline energia

$$E_0 = P_0 \cdot u = \frac{P_0 \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}{60} = M \cdot \omega = M \frac{u}{r} \quad (30).$$

Pinna pöörlemisel ümber telje  $O$  muutub kohtumisnurk  $\alpha$  ja sellele vastavalt ka jõud  $T$ . Asudes põigiti ( $y-y$ ) tuule suunale on jõud  $T = P_0$  (maksimaalne) ja rööbiti ( $x-x$ ) asendis  $T = 0$ .

Märkides keskmise suurusega jõu  $T_k$ , siis

$$T_k \cdot r \cdot \pi = P_0 \cdot 2 \cdot r,$$

ja

$$T_k = \frac{2}{\pi} P_0 = 0,64 \cdot P_0 \quad (31)$$

ning kasutegurit  $\eta = 0,189$  (lk. 29), saame

$$E_0 = \eta \cdot T_k \cdot u = 0,189 \cdot 0,64 \cdot P_0 \cdot u = 0,121 \cdot P_0 \cdot u \quad (32).$$

Sääraselt liigub pind positiivsel (+) poolel. Negatiivsel (-) poolel sunnib tuul pinda tagasi pöörduma ja pind jääks seisma. Selle vältimiseks moodustada kate  $\Lambda$  (joon. 40). Kuna kattega varjatud pindu ei haara tuul, kujuneb v. 32 täiendavalt

$$E_0 = \eta \frac{z}{2} P_0 \cdot u = 0,061 \cdot z \cdot P_0 \cdot u \quad (33)$$

kus  $z$  on pindade arv.

### c. Horisontaalteljega tiivik.

Horisontaalteljega tiiviku telg on rööbiti tuule suunaga. Tiiviku ülesanne on tiiviku tiirlemispinnast läbivoolava õhu liikumisenergiat võimalikult suuremal hulgal muuta mehaaniliseks tööks.

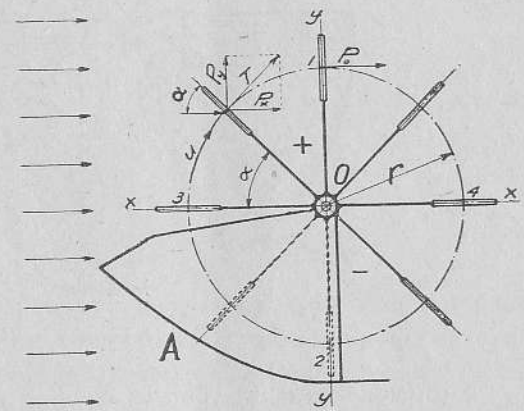
Tiiviku tiirlemispinnaks nimetame ringikujulist pindala  $F$ , mille läbimõõtu  $D$  mõõdetakse tiiva otstest. Tiibade pinnaks

nimetame üksikut tiibade pindade summat  $\Sigma f$ . Pindala  $F_1$ , piiratud läbimõõduga  $D_1$ , kujutab ebatäielikult rakendatavat seesmist osa. Teguvõimelist pindala  $F_0$  piirab läbimõõt  $D_0$ . Tiibade otstest ebatäielikult rakendatav pind on  $F_2$  (joon. 41).

Tiirlemispind  $F$  (mille läbimõõt  $D$ ), olenevalt kasutegurist  $\eta$ , määrab rakendatava energia hulga.

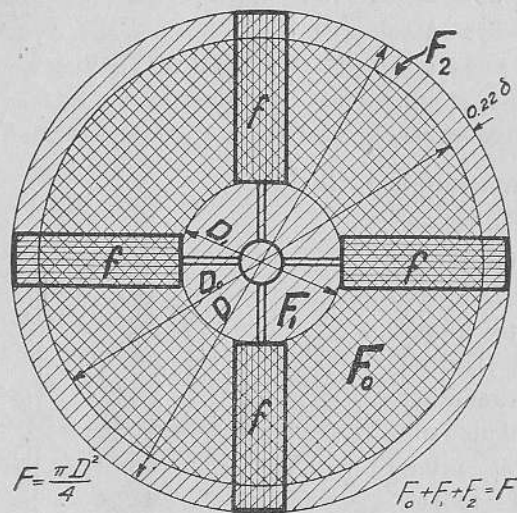
Joon. 22 ja 23 alusel on tiiviku tiirlemispinnast läbivoolava õhumassi maksimaalne võimsus (v. 20)

$$E_{\text{maks.}} = \frac{16 \rho \cdot v^3 \pi \cdot D^2}{27 \cdot 2 \cdot 4} = 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{mkg/sek.})$$



Joon. 40.

Sõltuvalt tiibade profiilist ja arvust, kadudest tiibratta kesk-  
kohas ja tiivaotstes, mehaanilistest takistustest, on saavutatav võim-  
sus väiksem.



Joon. 41.

Normaalne (tegelik) võimsus on

$$E_n = \eta_o \cdot E_{\text{maks.}} = \eta_o \cdot 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (34)$$

Tiiviku võimsuse üldine kasutegur (v. 21) on avaldatav

$$\eta = \frac{E_n}{E} = \eta_o \cdot \eta_{\text{maks.}} \quad (35)$$

kus  $\eta_{\text{maks.}} \sim \frac{16}{27} \sim 0,60$  (lk. 27) on kõigil horisontaaltiivikuil ühine.

Kasutegur  $\eta_o$  iseloomustab tiivikut ja on parimatel 0,6 kuni 0,8,

seega  $\eta = \eta_o \cdot \eta_{\text{maks.}} = 0,35$  kuni 0,46.

Tiiviku kasutegur

$$\eta_o = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \quad (36)$$

kusjuures:

$\eta_1$  oleneb tiiviku keskkohta kasutamatuses (0,90 – 0,97)  
 $\eta_2$  tiibade kasutegur (0,87 – 0,93)  
 $\eta_3$  oleneb kadudest tiivaotstes (0,83 – 0,93)  
 $\eta_4$  = mehaaniline kasutegur (0,90 – 0,95)

Tiiviku pinna teljepiirkonnas kasutamata osa  $F_1$  suurus oleneb tiibade konstruktsioonist. Kuna see osa tiibadest ei ole suuteline tuule-energiat rahuldaval määral rakendama, siis ei ole tasuv selles piirkonnas tiibu viimistella. Harilikult lühendame tiibade rummu-poolset osa aeglaselt pöörlevatel tiivikutel  $\frac{1}{3}$  ja kiiresti pöörle-vatel  $\frac{1}{6}$  tiivapikkuse võrra. Seega vastavate pindade suurused kujunevad:

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - R_1^2 \cdot \pi = R_o^2 \cdot \pi - i^2 \cdot R_o^2 \cdot \pi \quad (37)$$

kus  $i = \frac{R_1}{R_o} = \frac{D_1}{D_o}$  ja  $R_o - R_1 = \frac{D_o - D_1}{2}$ . Seega aeglaselt jooksvatel

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - \frac{1}{9} R_o^2 \cdot \pi = 0,888 \cdot R_o^2 \cdot \pi \quad (38)$$

ehk  $\eta_1 \approx 0,89$ , ja kiiresti jooksvatel

$$F_o = R_o^2 \cdot \pi - \frac{1}{36} R_o^2 \cdot \pi = 0,973 \cdot R_o^2 \cdot \pi \quad (39)$$

ehk  $\eta_1 \approx 0,97$ .

Järgnevalt vaatleme tiivaprofiilide valikut ja nende kallakut tuule suunas, ning millest olenevad kaod tiibadel ja nende otstel.

Tiivad liiguvad tuule rõhu mõjul põiki tuult kiirusega  $u$ , kusjuures tuule kiirus pidurdub tiibade pindadel ja ühtlasi aeglustub, kaotades algkiirusest  $\frac{1}{3}$ . Seega  $E_{\text{maks.}}$  puhul tiivikust läbivoolava õhu kiirus on

$$v_o = \frac{2}{3} v = 0,666 \cdot v \quad (40)$$

ja tuule kiirus liikuvate tiibade suhtes on relatiivne

$$w = \sqrt{v_o^2 + u^2} \quad (41)$$

Sellest nähtub, et kiirus  $w$  oleneb tuule ja tiibade kiirusest. Kogu tiiva kiirus ei ole ühtlane, vaid oleneb kaugusest pöördteljest. Sellest tingituna riba  $a$  pinnad (joon. 42)  $f = a \cdot b$  liiguvad

kiirusega  $u_r = \frac{r}{R} u = \frac{r}{R} k \cdot v = i \cdot k \cdot v \quad (42)$

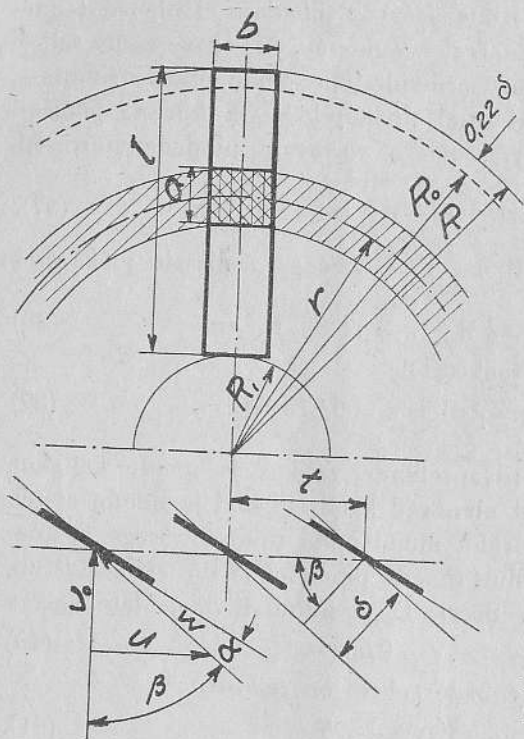
kus  $i = \frac{r}{R}$  ja  $k$  kiirusemoodul. Tiiva pikkus  $l$  on jagatud  $a$ -laius-teks ribadeks, millede arv ühel tiiva pinnal



$$e = \frac{R - R_1}{a} = \frac{l}{a} \quad (43).$$

Kiirusemooduliks nimetatakse tiivaotsa ja tuule kiiruse suhet

$$k = \frac{u}{v} \quad (44).$$



Joon. 42.

$$P_y = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot a \cdot b \cdot c_y = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot f \cdot c_y \quad (46),$$

siis lahutades komponentideks, saaksime tiiviku tiirlemise sihis jõu (joon. 43)

$$T_1 = P_y \cdot \cos \beta \quad (47)$$

ja tiiviku telje sihis

$$S_1 = P_y \cdot \sin \beta \quad (48).$$

Takistusjõu (v. 24)

Relatiivne tuulekiirus  $w$  moodustab telje, millest ühel pool asub seadnurk  $\beta$  ja teisel pool kohtumisnurk  $\alpha$ . Siinjuures

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{u_r}{v_0} = \frac{u_r}{2/3 v} = 1,5 \frac{u_r}{v} = \\ &= 1,5 \cdot i \cdot k \quad (45). \end{aligned}$$

Nagu eespool kirjeldatud, liiguvad tiiva ribad erineva kiirusega, olenevalt kaugusest pöördteljest, millest tingituna tiib tuleb kujundada sääraseks, et iga riba saaks sobiva kohtumisnurga  $\alpha$ . See kohtumisnurk on sõltuv profiilist (joon. 30-35), millest oleneb tiiviku kasutegur.

Kui tiiva pinna  $a$  laiuse riba tõstejõud (v. 23)

$$P_x = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot a \cdot b \cdot c_x = \frac{\rho}{2} w^2 \cdot f \cdot c_x \quad (49)$$

lahutamisel saaksime

$$T_2 = P_x \cdot \sin \beta \quad (50)$$

ja

$$S_2 = P_x \cdot \cos \beta \quad (51)$$

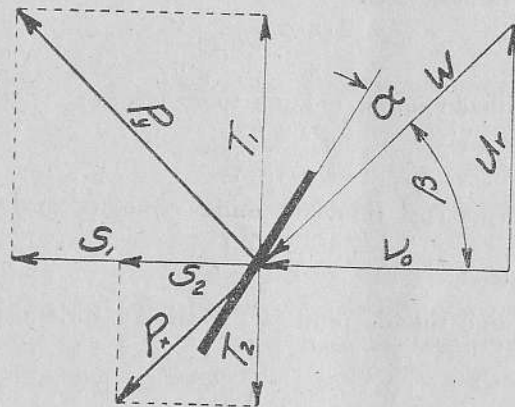
Vastastikku suunatud jõudude  $T_1$  ja  $T_2$  vahe on tangentsiaaljõud

$$T = T_1 - T_2 = P_y \cdot \cos \beta - P_x \cdot \sin \beta \quad (52)$$

tiiva riba käivitamiseks. Tiiviku telje suunas jõud

$$S = S_1 + S_2 = P_y \cdot \sin \beta + P_x \cdot \cos \beta \quad (53)$$

mõjub tuule kiirust aeglustavalt (joon. 43).



Joon. 43.

Nagu tähendatud, saab ainult osa voolava õhu liikumise energiast rakendada. Tiirlemispinnast, mille moodustab tiivariba tiirlemine, voolab läbi õhk mahuga

$$Q = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot a \cdot v_0.$$

Jõu  $S$  saavutamiseks, mis aeglustaks tuulekiirust  $v$  kuni  $v_1$ , peab

$$S = \rho \cdot Q (v - v_1) = 2 \rho r \pi a v_0 (v - v_1) \quad (54)$$

ja olenevalt tiibade arvust  $z$  (v. 48. ja 49)

$$S = z \cdot P_y \cdot \sin \beta = z \frac{\rho}{2} u \cdot w \cdot a \cdot b \cdot c_y \quad (55),$$

Võrrandeist 54 ja 55:  $z \frac{\rho}{2} u \cdot w \cdot a \cdot b \cdot c_y = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot a \cdot v_o \cdot 2 (v - v_o) \rho$

$$\text{saame tiiva laiuse } b = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} \cdot \frac{4}{c_y} \cdot \frac{v_o}{u} \cdot \frac{v - v_o}{w}$$

kus  $v - v_1 = 2 (v - v_o)$  ja  $\sin \beta = \frac{u}{w}$ . Asendades  $v_o = \frac{2}{3} v$  (v. 40), on tiiva laius

$$b = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} \cdot \frac{8}{9 \cdot c_y \cdot u \cdot w} \cdot v^2 = 5,59 \frac{r \cdot v^2}{z \cdot c_y \cdot u \cdot w} \quad (56)$$

Selle valemi esimese osaga

$$\frac{2 \cdot r \cdot \pi}{z} = 6,28 \frac{r}{z} \quad (57)$$

määratakse tiibade samm  $t$ , kuna teine osa

$$\frac{8}{9 \cdot c_y \cdot w} \cdot v \quad (58)$$

määrab pinna katvust tiibadest, mida nimetatakse katvusastmeks

$$\varphi = \frac{\Sigma f}{F} \quad (59)$$

kus  $\Sigma f =$  üldine tiibade pind ja  $F =$  tiiviku tiirlemispind.

$$\text{Ja } \frac{v}{u} \quad (60)$$

on kiirusemoodul (v. 44) ümberpööratud kujul  $k_o = \frac{v}{u}$ .

Kui tuule relatiivset kiirust (v. 41) väljendada

$$w = \frac{v_o}{\cos \beta} = \frac{2}{3} \frac{v}{\cos \beta} = 0,667 \frac{v}{\cos \beta} \quad (61)$$

saame tiiva laiuse (v. 56) ümberkujundamisel

$$b = \frac{5,59 \cdot r \cdot \cos \beta}{z \cdot c_y \cdot k \cdot v \cdot 0,667 \cdot v} \cdot v^2 = 8,38 \frac{r \cdot \cos \beta}{z \cdot c_y \cdot k} = \frac{1}{c_y} \cdot 8,38 \frac{r}{z} \cdot \tau \quad (62)$$

$$\text{kus } \tau = \frac{\cos \beta}{k}$$

Tiibade laiuse  $b$  määramisel väljutakse kiirusemoodulist  $k$  ja arvutatakse ühtlasi  $\cos \beta$ . Kuid tiibade arv  $z$  olgu kooskõlas tiiva

laiusega  $b$ , kus sobiva profiili valikul võib, olenevalt tiiviku konstruktsioonist, tiibade laius proportsionaalselt tiibade arvule laiem või kitsam olla. Profiilide sobivuse eelduseks on tegurite  $c_x$  ja  $c_y$  suhe, nn. lauglemisarv  $\mathcal{E}$  (v. 25), vastavalt kohtumisnurgale  $\alpha$ .

Tagasi tulles komponentidele  $T$  ja  $S$  leiame, et tangentsiaal jõud (v. 52)

$$T = P_y \cdot \cos \beta (1 - \mathcal{E} \cdot \text{tg} \beta) \quad (63)$$

ja aktsiaal jõud (p. 53)  $S = P_y \cdot \sin \beta (1 + \mathcal{E} \cdot \text{ctg} \beta)$  (64)

ja kui seejuures rakendatud tuule liikumisenergia  $S \cdot v_o$ , millest tiiva pind omab liikumisenergia  $T \cdot u$ , siis nende suhe on tiiva

$$\text{kasutegur } \eta_2 = \frac{T \cdot u}{S \cdot v_o} = \frac{1 - \mathcal{E} \cdot \text{tg} \beta \cos \beta}{1 + \mathcal{E} \cdot \text{ctg} \beta \sin \beta} \frac{u}{v_o}$$

Kuna  $\frac{u}{v} = \text{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}$ , siis tiibade kasutegur kujuneb

$$\eta_2 = \frac{1 - \mathcal{E} \cdot \text{tg} \beta}{1 + \mathcal{E} \cdot \text{ctg} \beta} \quad (65)$$

Profiilitegurid  $c_x$  ja  $c_y$  ning lauglemisarv  $\mathcal{E}$  vastavalt kohtumisnurgale  $\alpha$  on toodud joon. 30 kuni 35.

Lauglemisarv  $\mathcal{E}$  on kõige olulisem kiiresti jooksvate tiivikute tiiva-profiilide valikul.  $\mathcal{E}$  valitakse võimalikult väike, sest (sõltuvalt kiirusemoodulist  $k$ , s. o.  $\text{tg} \beta = 1,5 k$ ) suurema lauglemisarvu valikul vähendame tunduvalt kasutegurit  $\eta_2$  (v. 65). Et aeglaselt jooksvatel tiivikutel on lauglemisarvu  $\mathcal{E}$  mõju kasutegurile  $\eta_2$  väike, siis võib kasutada ka viimistlemata tiivaprofiile. Järelikult lauglemisarvu  $\mathcal{E}$  ja tiivalaiuse  $b$  määramisel on aluseks kiirusemoodul  $k$ .

Tiivaribade kiirused ei ole ühtlased, vaid kasvavad proportsionaalselt kaugusega teljest, s. o. ribade ringjooksu kiirus  $u = \omega \cdot r$ .

Kui kiirusemoodul  $k = \frac{u}{v}$ , siis ribade ringjooksu kiiruse muutumisega

muutuvad ka üksikute ribade moodulid  $k$ , s. o. tiivaotstest alates kuni teljeni moodul  $k$  ja ühtlasi suhtelise kiiruse  $w$  seadnurk  $\beta$  väheneb.

Vaadeldes õhuvoolu tiivikule, nähtub, et õhk voolab tiibadele relatiivse kiirusega  $w$  ja lõigatakse tiibadest  $\delta$ -laiusteks ribadeks.

Aluseks võttes tiiva laiust (v. 62) selgub, et tiibade arvu suurendamisega vähendame proportsionaalselt tiibade laiust ja tiibade



sammu. Kuid joon. 43 nähtub, et õhuribade laius ei ole sõltuv tiiva laiusest, vaid tiibade arvust olenevast tiiva sammust  $t = 6,28 \frac{r}{z}$  ja tegurist  $\tau = \frac{\cos \beta}{k}$ .

Kui tiiva põiklõike kaugusega teljest muutuvad moodulid  $k$  ühes relatiivse kiiruse  $\omega$  nurgaga  $\beta$ , siis sellest sõltuvalt igas tiiva lõikes peab profiili määramisel arvutama tiiva laiuse ja samm, ning tiibadevahelise õhuriba laiuse

$$\delta = t \cdot \cos \beta \quad (66)$$

Õhuribade laiuste üleminekud olgu enam-vähem ühtlased, see tagab ühtlast õhu läbivoolu tiivikust ja ühtlast tuule-energia rakendamist.

Jälgides joon. 44 toodud tuulekiiruste vahet  $v - v_1$  tiibade pinnal, nähtub, et tuulekiiruste vahed kasvavad alates  $v - v_1 = 0$  kuni  $v - v_1 = \frac{2}{3} v = v_0$ . Olenevalt tiibadevahelise õhuriba  $\delta$  laiusest kiiruste vahe kasvamine 0 kuni  $v_0$  võib optimaalse (pideva joonega märgitud) või väiksema tõusuga (katkendjoonega) oma maksimaalset energiat andva suuruseni tõusta, kusjuures mõlema kiirusjoone vahe avaldab rakendamata osa tuule kiirusest kogu tiibade pinnal. See rakendamata osa tuule-energiast on sõltuv arvutuse ja profiili viimistlemisest, kuid lihtsustatud arvutamisel määrame tiivaotste piirkonna kasutamata osa  $F_2$  (joon. 41) valemiga

$$D - D_0 = 0,44 \cdot \delta \quad (67);$$

nagu see toimus teljepiirkonna kasutamata osa  $F_1$  määramisel lk. 41, kasutegur  $\eta_3$  onoleb kadudest tiivaotstes.

Mehaaniline kasutegur  $\eta_4$  onoleb takistustest tiiviku laagrites, juurde arvamata takistusi hammasrataste ülekandes ja mujal.

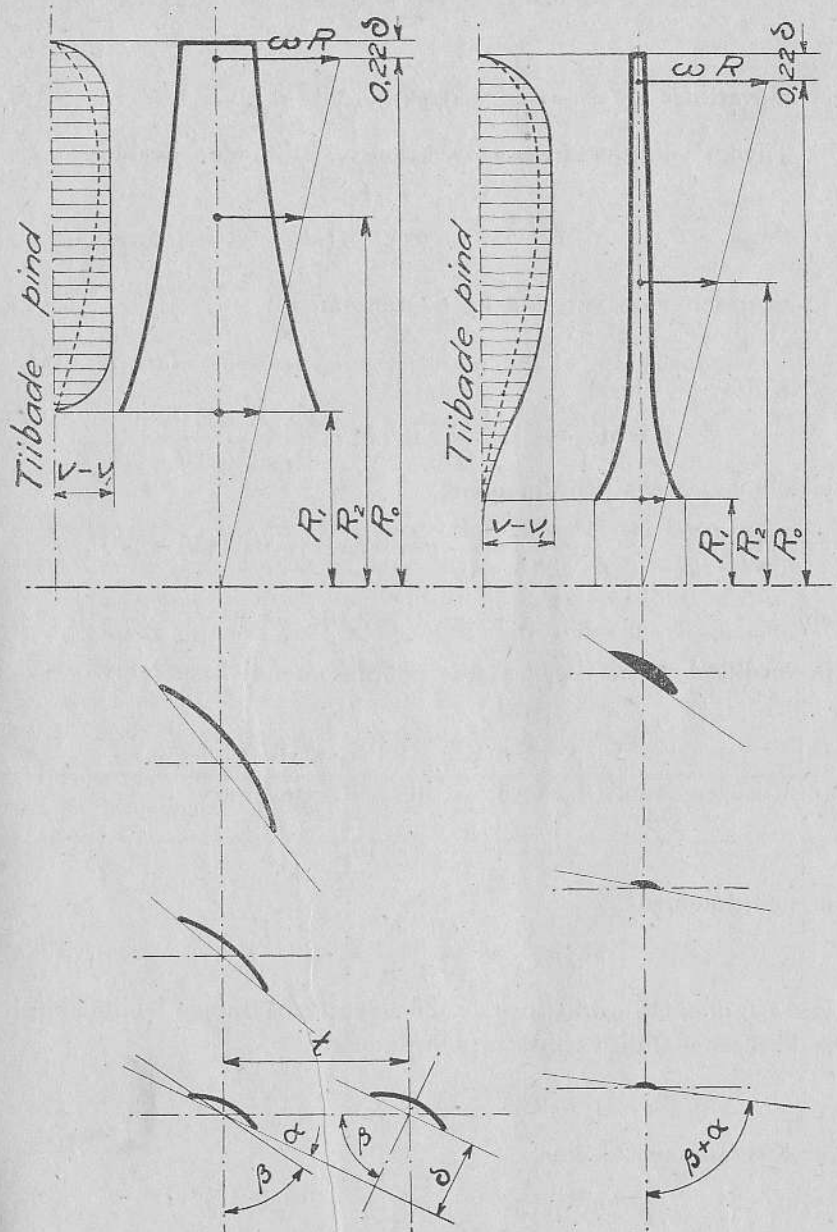
Kõiki loeteldud kadusid kokku võttes saame normaalse võimsuse kasuteguri v. 36 alusel  $\eta_0 = 0,6$  kuni 0,8.

Võttes aluseks keskmise kasuteguri  $\eta_0 = 0,7$ , siis lähimõõduga  $D$  tiiviku normaalne võimsus on (v. 20)

$$E_n = 0,7 \cdot 0,0291 \cdot v^3 \cdot D^2 = 0,0203 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{mkg/sek.}) \quad (68)$$

ehk hobujõududes (lk. 30)

$$N_n = \frac{E_n}{75} = 0,000271 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{PS}) \quad (69)$$



Joon. 44.

ja kilovattides  $N_k = \frac{E_n}{102} = 0,0002 \cdot v^3 D^2$  (kW) (70).

Tiiviku võimsuse kasutegurit saime v. 21 toodud avaldusest

$$\eta = \frac{E_n}{E} = \frac{E_n}{\frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

Samaselt võib võrrelda ka pöördmomente

Kui v. 30 alusel  $\eta_m = \frac{M_n}{M}$  (71).

$$E = M \frac{u}{R} = M \frac{2 \cdot u}{D} \text{ ehk } M = \frac{E \cdot D}{2 \cdot u} = \frac{E \cdot R}{u}$$

ja kui  $u = v$ , siis pöördmoment

$$M = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{D}{2 \cdot v} = \frac{1}{16} \rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot D^3 = 0,02455 \cdot v^2 \cdot D^3,$$

ehk  $\eta_m = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot R^3 = 0,197 \cdot v^2 \cdot R^3$  (72)

ja võrdlusele normaalsega saame pöördmomendi kasutegurit

$$\eta_m = \frac{2 \cdot M_n}{\rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{M_n}{0,197 \cdot v^2 \cdot R^3}$$
 (73)

Kiirusemooduli  $k$  alusel on tiibratta tiirude arv

$$n = \frac{60 \cdot k \cdot v}{\pi \cdot D} = 19,1 \frac{v \cdot k}{D}$$
 (74)

ja pöördmoment

$$M_n = \frac{E_n}{\omega} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \frac{E_n}{n} = 9,55 \frac{E_n}{n}$$
 (75),

kus  $\omega$  tähendab nurkkiirust (v. 28). Seega määratava läbimõõduga ja kiirusemooduliga tiibratta pöördmoment

$$M_n = 9,55 \frac{E_n \cdot D}{19,1 \cdot v \cdot k} = 0,5 \frac{E_n \cdot D}{v \cdot k}$$
 (76).

Käsitades v. 22, kus

$$E_n = \eta \cdot E = \eta \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \eta \cdot 0,049 \cdot v^3 \cdot D^2$$
 (77),

siis pöördmoment

$$M_n = 9,55 \frac{E_n \cdot D}{19,1 \cdot v \cdot k} = \eta \cdot 0,5 \cdot 0,049 \frac{v^3 \cdot D^2 \cdot D}{v \cdot k} = \eta \cdot 0,0245 \frac{v^2 \cdot D^3}{k}$$
 (78).

Seega kasutegurite vaherkord  $\eta_m = \frac{\eta}{k}$  (79)

ja pöördmoment avalduvad

$$M_n = \eta \cdot 0,0245 \cdot v^2 \cdot D^3$$
 (80).

Seejärgi tuule jõud suunatuna tiiviku teljele või aksiaal jõud

$$T_o = \frac{E_n}{v} = \eta \cdot 0,049 \frac{v^3 \cdot D^2}{v} = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2$$
 (81)

Näide 4.

Selgitamiseks, kuivõrd kiirusemoodul mõjutab tiiviku mõõte kasutamata osa tiivaotstes, tiibade arvu, kuju ja võimsuse kasutegurit jne., teeme arvutuse kahe võrdse võimsusega tiibrattale: üks neist aeglaselt (moodul 1,2) ja teine kiiresti (moodul 5,8) jooksev.

Tabelis lk. 49, 50 ja 51 on arvatatud tiibrattad, millede normaalne võimsus tuulekiirusel  $v = 5$  m/sek. on  $E_n = 69,2$  mkg/sek. = 0,92 PS = 0,70 kW. Tiibade arv on valitud  $z = 18$  ja 3 (joon. 44).

Kiirusemoodul	$k =$	1,2	5,8
	$v =$	5	5
	$\eta_2 =$	0,87	0,93
$D_o = 2 R_o = \sqrt{\frac{E_n}{\eta_2 \cdot 0,0291 \cdot v^3}}$	$\frac{D_1}{D_o} = \frac{R_1}{R_o} =$	4,67	4,52
	$\frac{D_1}{D_o} = \frac{R_1}{R_o} =$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$
	$R_o =$	2,34	2,26
	$R_1 =$	0,78	0,376
	$u = v \cdot k =$	6,0	29
	$\omega = \frac{u}{R_o} =$	2,56	12,8
	$n = \omega \frac{60}{2 \cdot \pi} =$	24,4	122,0



	R°	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>
	2,34	1,54	0,78	2,26	1,32	0,376
$u = \omega \cdot R =$	6,0	3,94	2,0	29	16,9	4,80
$k = \frac{u}{v} =$	1,2	0,79	0,40	5,8	3,38	0,96
$\text{tg} \cdot \beta = \frac{u}{v_0} = 1,5 \cdot k =$	1,80	1,18	0,60	8,70	5,06	1,44
$\beta =$	60° 57'	49° 44'	31° 00'	83° 27'	79° 52'	55° 14'
$\cos \beta =$	0,485	0,646	0,866	0,114	0,176	0,570
$\text{ctg} \beta =$	0,555	0,847	1,732	0,115	0,179	0,694
$\tau = \frac{\cos \beta}{k} =$	0,404	0,815	2,160	0,0197	0,052	0,594
Profil joon.	26	26	26	28	28	30
$\varepsilon =$	0,094	0,091	0,098	0,043	0,042	0,058
$c_y =$	0,80	0,88	1,12	0,35	0,35	0,56
$c_x =$	0,075	0,08	0,110	0,015	0,015	0,032
$\alpha =$	2°	3°	6°	1°	1°	1°
$z =$	18	18	18	3	3	3
$\frac{R}{z} =$	0,130	0,086	0,0433	0,755	0,440	0,125
$b = c_y \cdot 8,38 \cdot \frac{R}{z} \tau =$	0,35	0,516	0,875	0,044	0,067	0,347
$t = 6,28 \cdot \frac{R}{z} =$	0,815	0,54	0,272	4,75	2,76	0,785
$\delta = t \cdot \cos \beta =$	0,395	0,350	0,236	0,542	0,486	0,446
$\beta + \alpha =$	62° 67'	52° 44'	36° 00'	84° 27'	80° 52'	56° 14'
$R - R_0 = 0,22 \delta =$	0,087			0,119		
$D = 2 R =$	4,844 ~ 4,85 m			4,758 ~ 4,80 m		
$\eta_2 = \frac{1 - \varepsilon \cdot \text{tg} \beta}{1 + \varepsilon \cdot \text{ctg} \beta} =$	0,831	0,893	0,9412	0,626	0,788	0,916
$\eta_2 =$	1,052	1,077	1,169	1,005	1,0075	1,040
$\eta_2 =$	0,790	0,825	0,805	0,620	0,78	0,90
$\eta =$		0,35			0,35	

$$M_n = \eta \cdot 0,0245 \frac{v^2 \cdot D^2}{k} = \begin{array}{|c|c|} \hline 20,3 \text{ mkg} & 4,06 \text{ mkg} \\ \hline \end{array}$$

$$T_o = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2 = \begin{array}{|c|c|} \hline 10,0 \text{ kg} & 9,85 \text{ kg} \\ \hline \end{array}$$

Lõplikuks tiibade kuju ja mõõtude kindlaksmääramiseks on vaja arvutust viimistella.

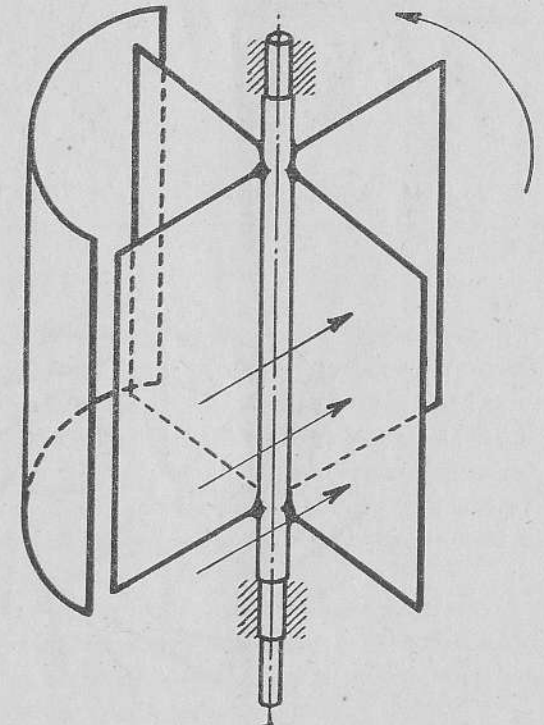
## 5. Tuulemootorite tüübid ja tornid.

### a. Vertikaalsed tuulemootorid.

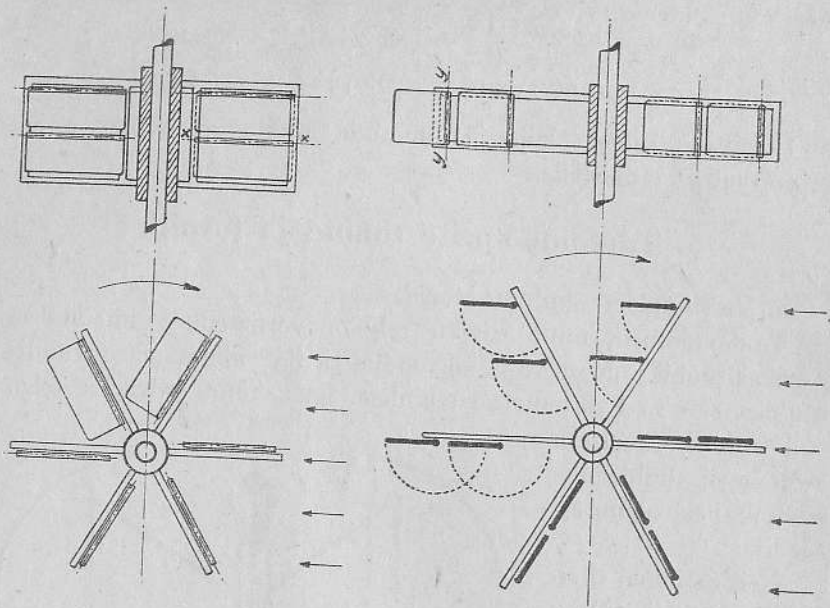
Tuulemootorit, mille tiiviku telg on vertikaalne, nimetatakse vertikaaltüübiks. Joon. 40 ja 45 toodud tiivikut nimetatakse trumlitüübiks, sest nad sarnanevad trumliga. Seda tüüpi tiivikute telge võib ka horisontaalseks asetada; siis tuulde juh-  
timiseks peab olema eri seadis.

Neil mõlemal tiivikul (joon. 40 ja 45) on vastu tuult pöörlevate osade varjamiseks kate. Selle katte kõrvaldamisel tuleks pinnad valmistada nii, et vastu tuult liikumisel tiiva pinnad pöörduvad tuule suunale serviti. Selleks peavad tiivad olema kerged, õhukesed ja hingedel vabalt liikuvad, mis võimaldab neil väiksema takistusega vastu tuult liikuda (joon. 46 ja 47).

Tiivad kinnitatakse tiivikraami külge radi-

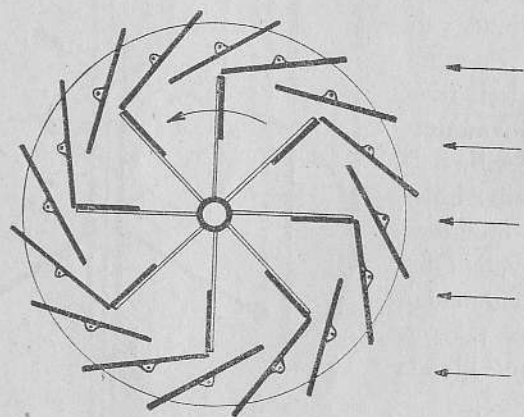


Joon. 45. Trumlitüüpi tiivik.



Joon. 46. Ukstüüpi tiivik.

Joon. 47. Ukstüüpi tiivik.

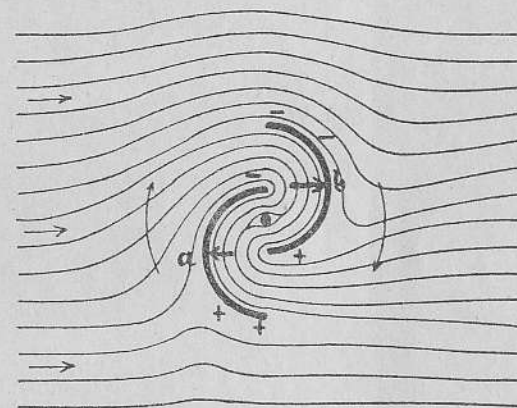


Joon. 48. Vesirattatüüpi tiivik.

aalselt (joon. 46) või tiiviku teljele rööbiti (joon. 47). Sääraseid tüüpe nimetatakse ukstüüpideks.

Ka vesiratta eeskujul on ehitatud tiivikuid (joon. 48).

Kuigi peale esiletoodute on veel teisigi ukstüüpi tiivikuid, piirdume näidatutega, sest ülejäänud on praktiliselt piiratud väärtusega põhjusel, et tiiviku vastu tuult liikuv osa on tuuleenergia kasutamiseks rakendamatu ja ühtlasi rakendatud tiivikuosa tiirlemise takistajaks.

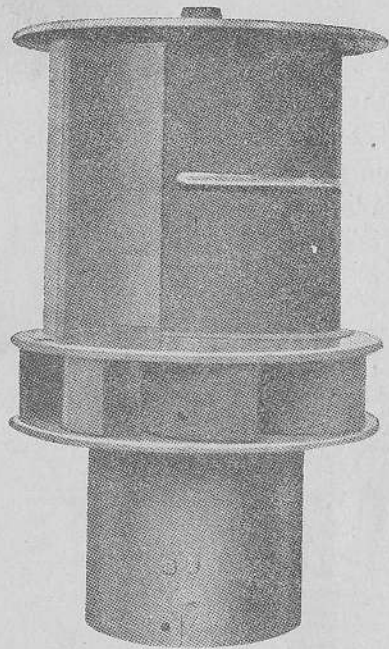


Joon. 49. Õhuvoolu spekter rootortiivikus.

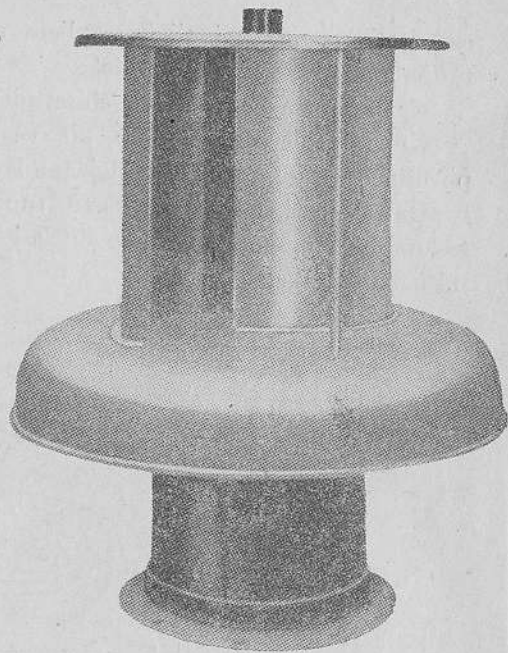
Vertikaalteljega tiiviku mõlema poole (osa) rakendamist võimaldab see tiiviku konstruktsioon, mida üldiselt tuntakse Savoniuse rootorina. See koosneb kahest tiivast, mis on saadud silindri poolitamisest oma telje sihis ja mis on vastastikku asetatud sääraselt, et tiiva „b“ õõnsale poolele voolav õhk võib edasi voolata tiiva „a“ õõnsale poolele, sellega seal vältida vaakuumi tekkimist (joon. 49) ja (kui tiivad, võrreldes tuulega, aeglaselt liiguvad) koguni soodsat survet tiivale „a“ avaldada.

Savoniuse rootorid on edukat kasutamist leidnud ventilaatorite käivitajatena, s. o. õhuvahetuse otstarbeks. Joon. 50 on Savoniuse rootor-ventilaator, mille pealne osa on kahetiivaline rootor ja alumine 8- kuni 12-tiivaline ventilaator.



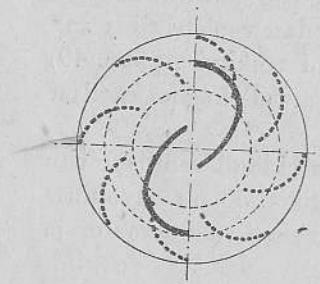


Joon. 50.  
Savoniuse rootor – ventilaator.



Joon. 51.  
Savoniuse rootor – ventilaator kattega.

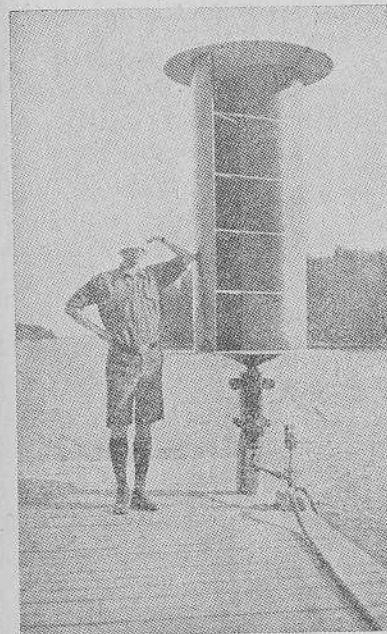
Rotor-ventilaator on määratud korstnaile tõmbe suurendamiseks ja elu-, tööstus-, kooli- jne. ruumide õhuvahetuseks. Joon. 51 kujutab kaetud tiibadega ventilaatorit, mis on määratud mere-sõidukeile ja nimetatakse meritüübiks. Mõlema tüübi kohta on andmed tab. 7.



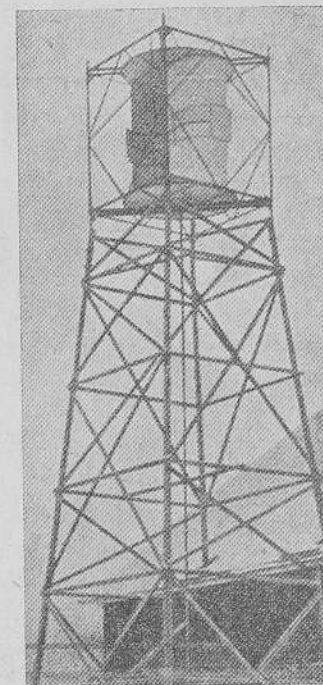
Tabel nr. 7.

Tüüp	Imemis-ava mm	Lähikaudne imemisvõime m <sup>3</sup> -tunnis tuulekiirusel m/sek.			
		1	2	3	4,5
SRV16	160	50	100	150	225
SRV20	200	85	170	250	380
SRV25	250	120	240	360	550
SRV30	300	180	360	540	810
SRV40	400	320	640	960	1440
SRV50	500	500	1000	1500	2250

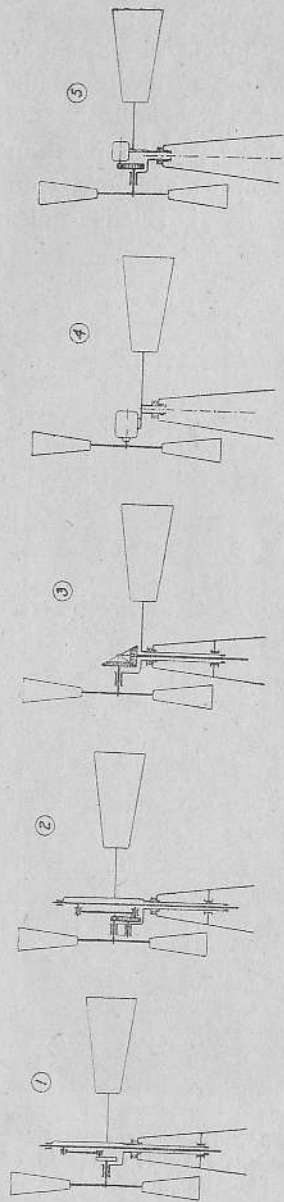
Savoniuse rootorit kasutatakse ka vee pumpamisel (joon. 52). Selle rootori mõlema otsplaadi läbimõõt on 120 cm ning nende vaheline kõrgus 196 cm, tiibade pind 1,88 m<sup>2</sup>, pöörlevate osade kogukaal 50 kg. Rotor ühes pumbaga asub sillal, mille kõrgus veepinnast on 2,5 m, ja pumbatav vesi juhatakse 3/4" vooliku kaudu 110 m kauguses olevasse veenõusse, mille kõrgus veepinnast on 15 m, kusjuures tuulekiirusel 3 m/sek. saavutati 100 ja tuulekiirusel 7 m/sek. 600 liitrit tunnis.



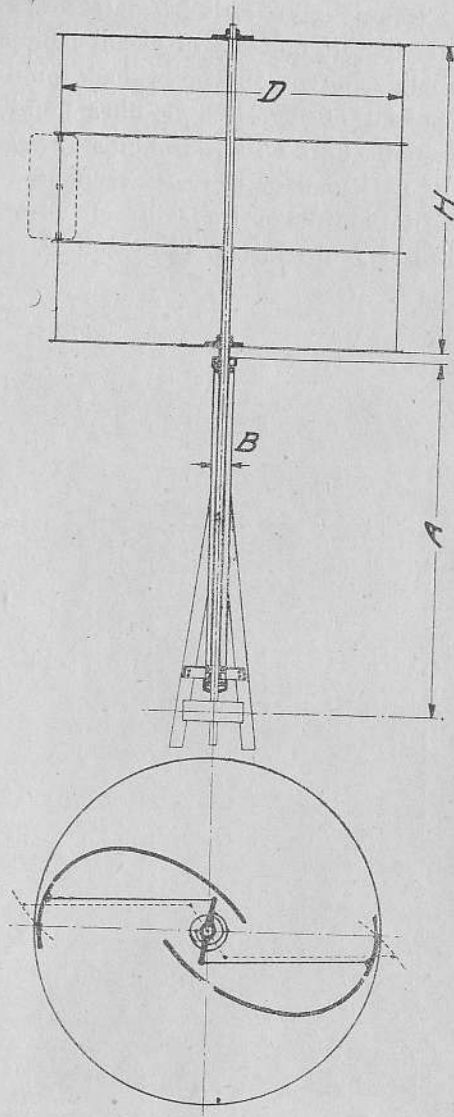
Joon. 52.  
Savoniuse rootor pumbaga.



Joon. 53. Rotor reguleerivate klappidega 5,4 m<sup>2</sup>; rootor 15 m kõrgusel puittornil.



Joon. 54.



Joon. tabel 8 juurde.

Peale ülalkirjeldatud seadise valmistatakse rootor-membraan-pumpi, millede üldmõõdud on toodud tab. 8.

Tabel nr. 8.

Tüüp	D	H	A	B	Vee maht liitrites 8 tun- niga. Tõstekõrgus 10 m. Tuulekiirusel $v = 4 \text{ m/s}$ .
1,0 m <sup>2</sup>	1100	950	1125	52	1500
2,0 m <sup>2</sup>	1100	1900	1485	80	3000
3,5 m <sup>2</sup>	1850	1900	1485	80	5250
5,25 m <sup>2</sup>	1850	2860	2245	100	8000
8,0 m <sup>2</sup>	2800	2860	2245	100	12000

Peale tüüpide 1 ja 2 m<sup>2</sup> on neil rootoreil tiiva välisel äärel tiirude arvu reguleerimiseks sellekohased ukсед. Rootori keskel asuv spiraalvedruga vinnak hoiab mõlemaid ukseid suletuna ja normaalse tiirude arvu ületamisel avanevad need tsentrifugaaljõu mõjul. Siis osa õhku voolab läbi ukse avade ja vastu tuult liikuv avatud uks mõjub tiirlemist pidurdavalt, mille tulemusena tuul enam ei suuda rootori tiirlemist kiirendada (joon. 53).

#### b. Horisontaalteljega tuulemootorid.

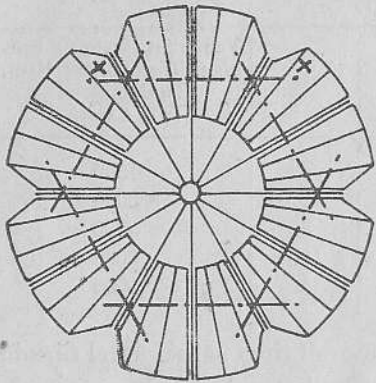
Horisontaalteljega tuulemootorite konstruktsioonide erinevus üldjoontes on alljärgnev (joon. 54):

1. Tiivik on otseseoses pumba vardaga, seega võrdub pumbakolvi käikude arv tiiviku tiirudega.
2. Tiivik on pumbavardaga ühendatud hammasratas-ülekande kaudu.
3. Tiivik on ühendatud püstvõlliga hammasratas-ülekande kaudu.
4. Tiivik asub torni tippu asetatud dünamo võllil.
5. Tiivik on torni tipus asetseva dünamoga ühendatud hammasratas-ülekandega.

Tuulemootorite reguleeritavus, s. o. tiiviku tuulde juhtimise ja tuules hoidmise seadmed jagunevad üldiselt kolme liiki: 1) tiibadest, 2) tiibrattast ja 3) sabast ehk nn. tuulelipust reguleeritavad.



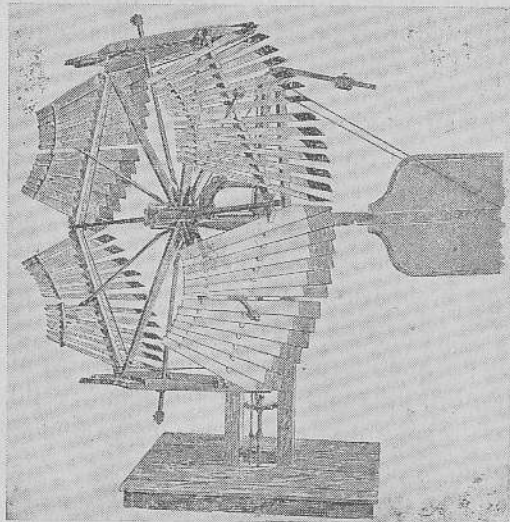
Tiibadest reguleeritavat tiivikut tuntakse Halladay tiivikuna ja on kujutatud joon. 55 töötavas ja joon. 56 väljalülitatud seisundis. Sellel tiivikul on tiivad gruppidena X–X telgedele monteeritud,



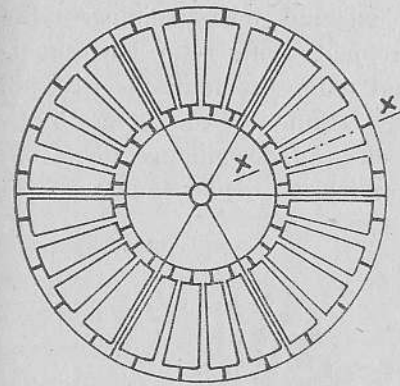
Joon. 55. Halladay-süsteemiline tiivik.

kus need hoitakse tuules vastava vedruga või vastukaaluseadisega. Liigse tuule survel pöörduvad tiivagrupid X–X teljel tuulest ära. Halladay süsteemi tiivik on vanemaid tüüpe.

Joon. 57 kujutab ultrasüsteemilist tiivikut. Selle tiiviku tiivad on üksikult monteeritud radiaalsetele pöördtelgedele. Tuulde ja tuulest ära pööramine toimub ühise seadisega eeltoodud tüübi eeskujul (joon. 58).

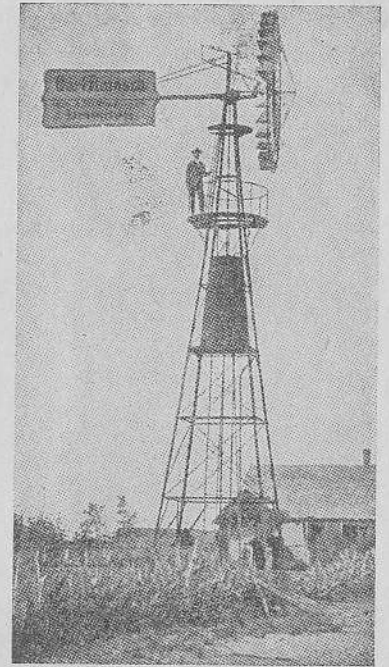


Joon. 56. Halladay-süsteemiline tiivik.

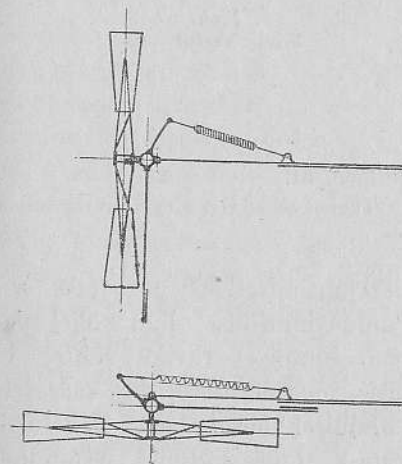


Joon. 57.

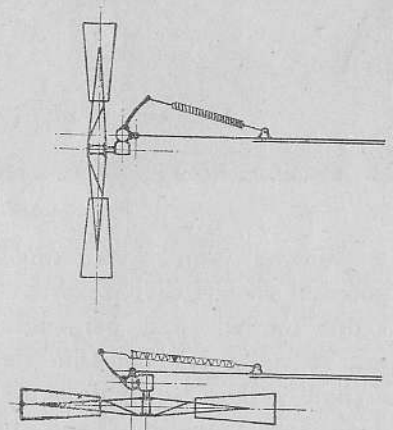
Ultrasüsteemiline tiivik radiaalsete pöördtelgedega tiibadega.



Joon. 58.



Joon. 59. Tormilipuga tiivik.

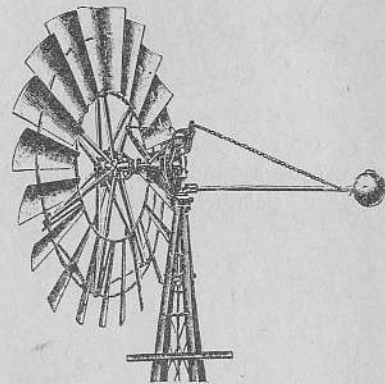


Joon. 60. Ekstsentrilise teljega tiivik.

Need mõlemad tiivikukonstruktsioonid oma paljulügendilise reguleerimiseadiseega vajavad suuremaid tootmis- ja korrashoiukulusid kui järgnevana kirjeldatud eklipssüsteemilised tiivikud. Eklipssüsteemi puhul pööratakse tiivik tuulde ja tuulest ära tervikuna. On kaks varianti: 1) külje- ehk nn. tormilipuga (joon. 59) ja 2) tiiviku telje asetamisega ekstsentriliselt tiiviku tuulde pööramise telje suhtes (joon. 60).



Joon. 61.  
Tuulemootor  $D=3$  m vesivarustuseks.



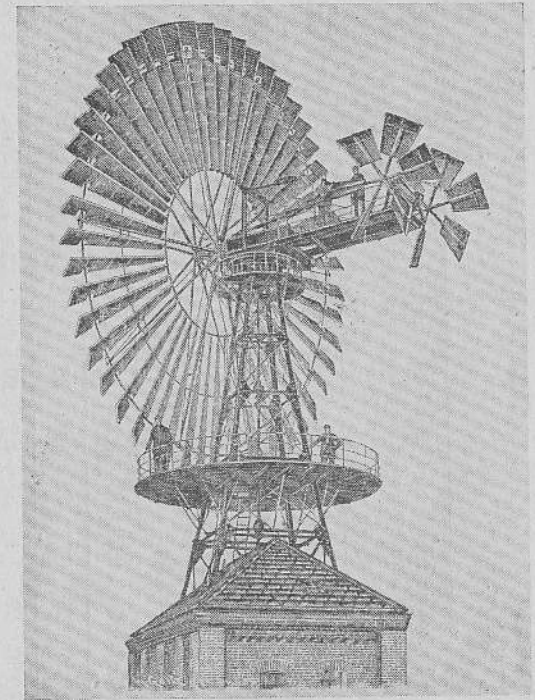
Joon. 62.  
Tiivik vastukaaluga.

Mõlemal juhul tiiviku tuulest ärajuhtimisel lipp pööratakse või pöörduv rööbiti tiiviku suhtes. Tuulde juhtimisel lipu küljel olev vedru tõmbab lipu perpendikulaarseisundisse tiiviku suhtes. Et aga vedrud võivad kaotada elastsuse, monteeritakse lipp sääraselt, et lipu raskuse tuulest ärapööramise tõuseb, sellega võimaldades lipu omakaalu abil tiibratast tuuleshoidmise seisundisse viia (joon. 61).

Nagu eespool (55, 56, 57, 58) nähtus, olid tiivikud reguleeritavad tiibadest ja lipu ülesandeks oli ainult tiivikut tuules hoida. Eklipssüsteem (joonised 59, 60 ja 61) aga võimaldab selle lihtsuse, et reguleerimine ning tuules hoidmine ja tuulest ärajuhtimine toimub ainult tiiviku ja lipu koostöega. Kui aga lipp on määratud ainult tiiviku tuules hoidmiseks, s. o. kui tiiviku tiivad on reguleeritavad üksikult või gruppides, siis võib lipust loobuda, asetades tiiviku tornile allatuult ja mehhanismi tasakaalustamiseks moodustades varda vastukaalukuuliga (joon. 62).

Suuremate läbimõõtudega tiivikute tuules hoidmiseks asendavad lippu külgtiivikud ehk nn. kaksikseadrosid (joon. 63). Siis on tiivik reguleeritav joon. 57 ja 58 näidatud põhimõttel.

Joon. 55 kuni 63 tiivikuid nimetatakse tuuleroosideks. Neid valmistati puust ja hiljem galvaniseeritud terasest (Ameerikas), peamiselt väiksemajoolisi, vesivarustusseadmeile. Need on levinud ka Euroopas ja valmistatakse tiiviku läbimõõduga 2 kuni 12 m. Enamasti kasutatakse vesivarustustes 3- kuni 4,5- ja masinate käivitamiseks üle 5-m läbimõõduga tiivikuid. Tabelis nr. 9 on toodud tiiviku läbimõõdule (meetrites) vastav tiibade pind (ruutmeetrites),



Joon. 63. Tiivik kaksikseadrosidega  
 $D=14$  m veski käitamiseks.

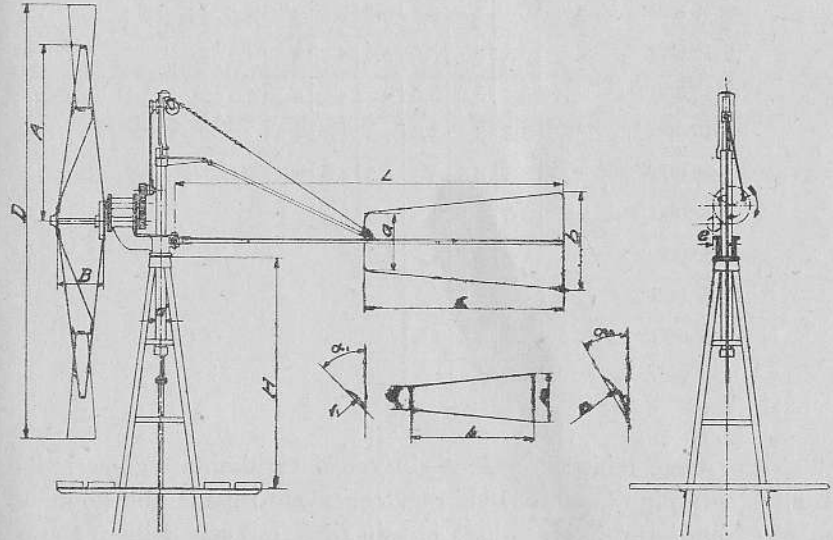


Tabel nr. 9.

Tiiviku läbimõõt m	Tiibade pind m <sup>2</sup>	Võimsus ja tiirude arv, kui tuule kiirus on																							
		3		3,5		4		4,5		5		6		7		8 m/sek									
		N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n	N	n								
3	4,5	0,07	37,5	0,12	42	0,18	47	0,25	53	0,35	58	0,6	70	0,9	80	1,3	87								
3,5	6	0,09	32	0,15	36	0,20	41	0,30	45	0,45	50	0,75	60	1,2	68	1,7	74								
4	8	0,13	28	0,20	32	0,30	36	0,45	39	0,60	44	1,0	52	1,65	60	2,4	65								
4,5	10	0,16	25	0,26	29	0,40	33	0,55	35	0,75	39	1,3	47	2,0	53	3,1	58								
5	12	0,23	23	0,36	26	0,50	29	0,75	32	1,0	35	1,8	42	2,8	48	4,25	52								
6	18	0,33	19	0,55	21	0,80	24	1,1	27	1,5	29	2,65	35	4,2	40	6,3	44								
7	24	0,45	16	0,70	18	1,1	21	1,5	23	2,0	25	3,6	30	5,7	34	8,5	37								
8	31	0,60	14	0,90	16	1,4	18	1,9	20	2,7	22	4,6	26	7,3	30	11,0	33								
9	40	0,70	13	1,15	14	1,7	16	2,5	18	3,4	20	5,8	23	9,25	27	13,8	29								
10	49	0,90	12	1,4	13	2,1	14	3,0	16	4,15	18	7,1	21	11,3	24	16,7	26								
11	59	1,1	10	1,7	12	2,5	13	3,6	15	4,9	16	8,5	19	13,5	23	20,0	24								
12	70	1,3	9	2,0	11	3,0	12	4,25	13	5,8	15	10,0	18	16,0	20	23,8	22								

võimsus  $N$  (hobujõududes) ja tiirude arv  $n$  (minutis), kui tuule kiirus on 3 kuni 8 m/sek.

Vesivarustuseks valmistatakse tuulemootoreid kahes variandis: tiivik otseseoses pumbavardaga (joon. 54-1) ja hammasratas-ülekandega (joon. 54-2). Esimene neist on vähem tarvitatav põhjusel,



Joon. 64. Tuulemootori üldmõõdud.

et ühekordse tegevusega pumba varras mõjub tiivikule vahelduva koormana ja selle tagajärjel, surnud punktide läbistamisel, varda tõuked kanduvad tiivikule ja põhjustavad tiiviku ebaühtlase tiirlemise. Siinjuures hammasratas-ülekanne võimaldab ka tiiviku hoogmomenti paremini kasutada. Hammasratas-ülekanne valitakse 1:2 kuni 1:3,5 ja kolvikäik 140-200 mm. Hammasratas-ülekandega tuuleturbiini kujutab joon. 64 ja tööd 8 tunni kohta tab. nr. 10.

Vesivarustusturbiinide reguleeritavust on võimalik teostada joonistel 56, 58, 59, 60, 61 ja 64 näidatud põhimõttel, milledest kõige sobivamaks osutub ekstsentriline tiiviku asetus (joon. 60 ja 64).

Tabel nr. 10

Vee maht päevas liitrites	Tõste kõrgus										
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100 m
6.000	3	3	3	3	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5
8.000	3	3	3	3	3,5	3,5	3,5	4	4	4,5	
10.000	3	3	3	3,5	3,5	4	4,5	4,5	4,5		
12.000	3	3	3,5	3,5	4	4,5	4,5	4,5			
15.000	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5				
17.000	3,5	3,5	3,5	4	4,5	4,5					
20.000	3,5	3,5	4	4,5	4,5						
24.000	3,5	4	4	4,5	4,5						
28.000	4	4	4,5	4,5							
32.000	4	4,5	4,5								
36.000	4,5	4,5	4,5								
40.000	4,5	4,5									

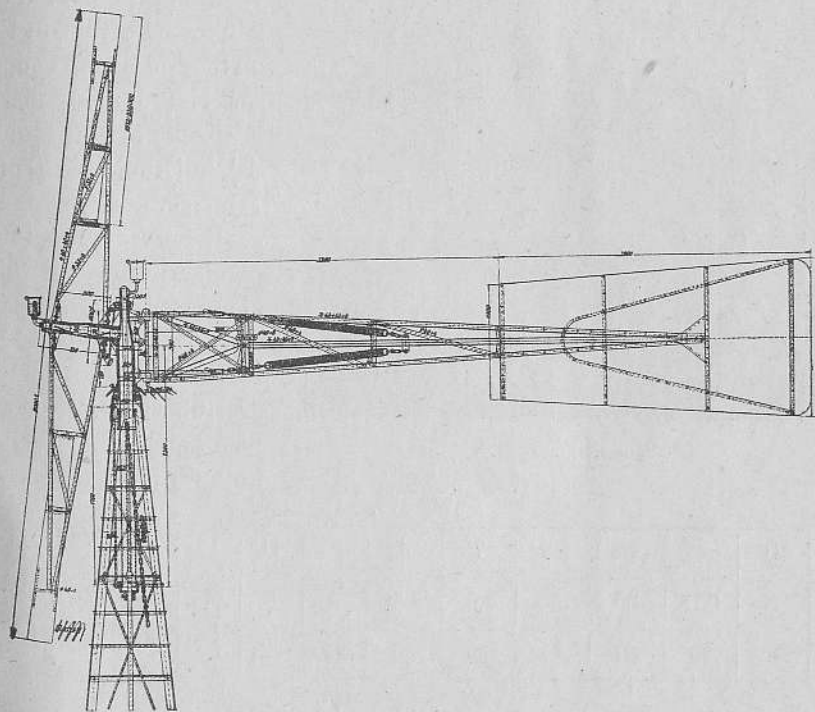
Torni telge läbistava võlliga ringveoga turbiinide reguleerimine toimub tormilipu (joon. 65) või reguleeritavate tiibade abil (joon. 62 ja 63). Nende turbiinide suhtes ei sobi tiiviku ekstsentriline asetus, sest koonilised hammasrattad, mis võimaldavad ekstsentrilist asetust, on selleks liiga kallid. Seevastu kooniliste hammasrattaste ülekannet võimaldab  $3^{\circ}$  kuni  $10^{\circ}$  kallutatud tiivikut (joon. 65). Enamik ringveoturbiine ehitatakse kallutatud tiivikuga, kuid vesivarustuseks (s. o. üles-alla õõtsuva pumbavardaga turbiinidel) kallutamine ei osutu konstruktiivselt praktiliseks. Joon. 64 ja 65 turbiinide mõõdud on toodud tab. nr. 11.

Joon. 65 kujutab tuuleturbiini ringveoks, s. o. masinate käitamiseks (joon. 54–3 tüüp). Energia ülekannet tiivikult torni läbistavale püstvõllile toimub hammasrattas-ülekandega, mille suhe valitakse 1:3 kuni 1:5.

Eeltoodud tuuleroositüübile aerodünaamiliselt parema kuju saamisest arenes Soerenseni turbiin. See tüüp kujunes 10-tiivalisest

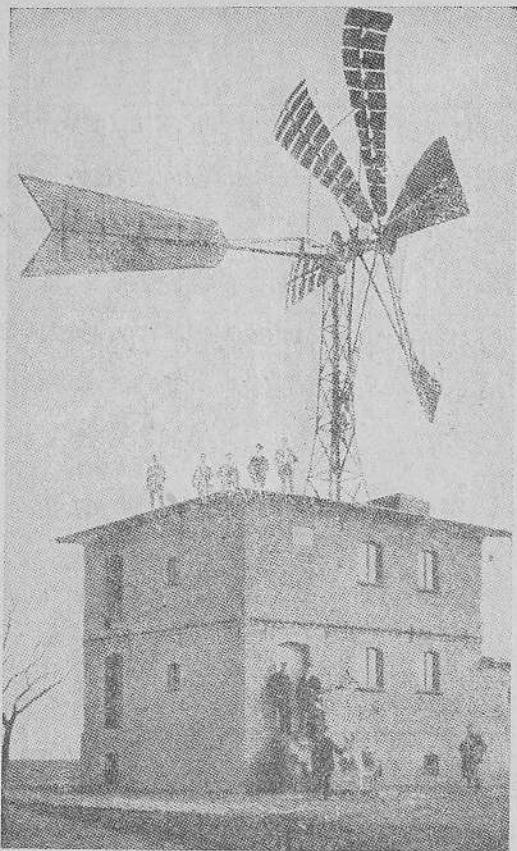
Tabel nr. 11.

D m	A	B	L	a	b	c	d	e	H	k	m	n	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>
3	1230	300	2700	410	680	1380	2"	87	1600	720	260	140	400	200	30°	40°
3,5	1480	300	3200	410	680	1380	2"	87	2000	850	340	160	500	250	30°	40°
4	1600	400	3800	760	1160	1960	3"	115	2250	1200	400	170	550	280	26°	42°
4,5	1850	400	4200	760	1160	1960	3"	115	2500	1250	430	190	600	300	26°	42°
5	2050	450	5200	780	1200	2450	3 1/2"	—	3000	1530	450	200	700	350	22°	42°
6	2500	500	6310	1100	1500	2950	4"	—	3500	1975	630	300	800	400	15°	44°



Joon. 65. Tuulemootor, D=6 m.





Joon. 66. Töös.

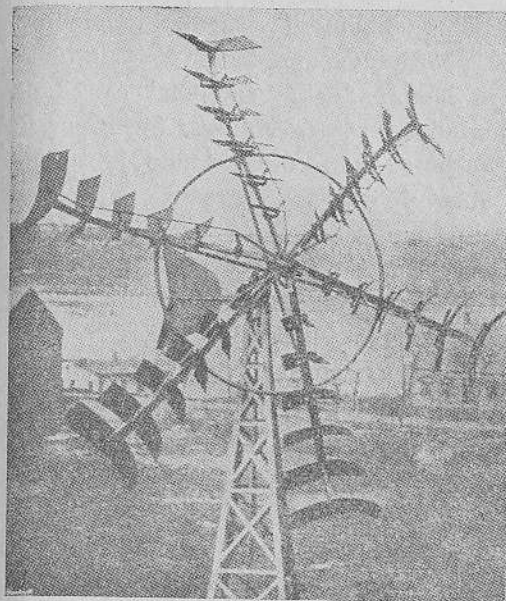
Tabel nr. 12

D	4	4,5	5,5	7	8	9	11	12	15	17	20
N	0,75	1,0	1,75	3,0	4,5	6	8	9,5	15	20	27
n	70	60	45	35	30	25	22	20	16	13	10

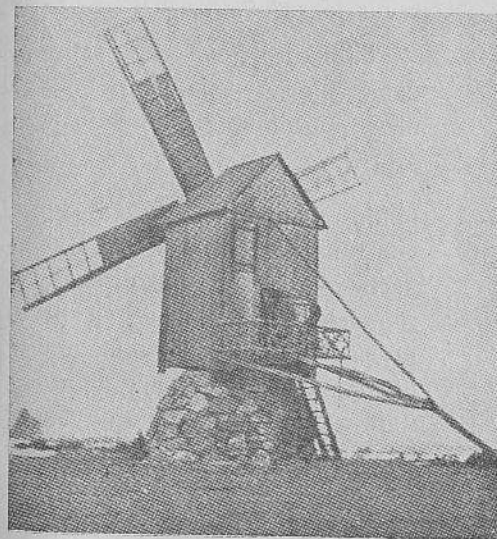
Suuremajuliste tuuleturbiinide ehitamisel on püütud ka vananenud tuulikute tüüpe moderniseerida. Vaatleme üldtuntud nn.

tiivikust, millest neli tiiba tormist murti. Umberehitamisel kujundati kuuetiivaline, ettepoole pööratud tiivaotstega koonusetaline tiivik. Soerenseni tiiviku pinna katvustaste on tuuleroosiga võrreldes väiksem. Joonis 66 kujutab Soerenseni tuulemootorit töövalmina ja joon. 67 väljalülitatuna. Tab. nr. 12 on toodud tiiviku võimsus  $N$  (hobujõududes) ja tiirude arv  $n$  (minutis), kui tuule kiirus on 7 m/sek.

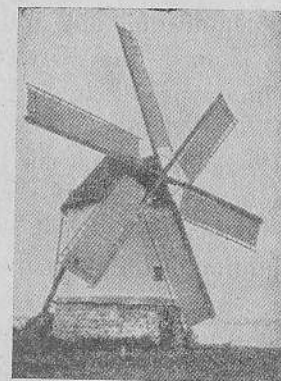
Soerenseni mootori reguleerimine toimub klapposadeks lahutatud tiibades, mida juhatakse tuulde ja tuulest ära ühisest vastukaaluga kangist, nagu seda kujutab joon. 67.



Joon. 67. Välja lülitatud.



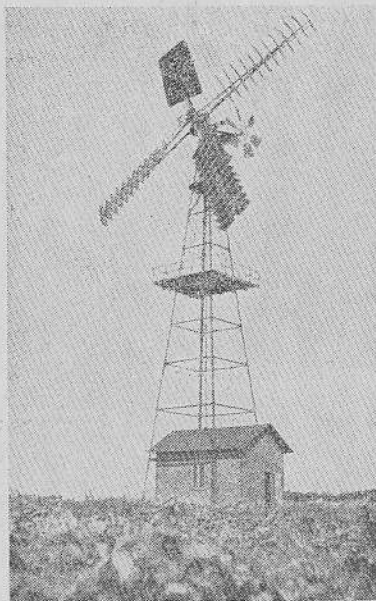
Joon. 68.  $D=13$  m, veski käitamiseks Saaremaal.



Joon. 69. Veski käitamiseks.

hollandi tuulikuid, milledest joon. 68 kujutab pukktüüpi (Saaremaa) ja joon. 69 massiivsel alusel pöörtdanuga tuulikut. Neist esimest ehitati peamiselt kuni 10-m läbimõõduga (Saaremaal ca 13 m. Uksikasjaline joonis on avaldatud ajakirjas „Tehnika Kõigile” nr. 7, 1938), ja arendasid kuni 5 hobujõudu, ning tuulde juhtimine toimus kogu tuulikut tema alusel pöörates. Teist ehitati kuni 28-m läbimõõduga ja nad arendasid kuni 50 hobujõudu, ning tuulde juhtimine toimus tanu pööramisega.

Tehnilisel viimistlemisel on neist tuulikuist kujunenud pöördpindadega neljatiivalised tiivikud (joon. 70 ja 71).



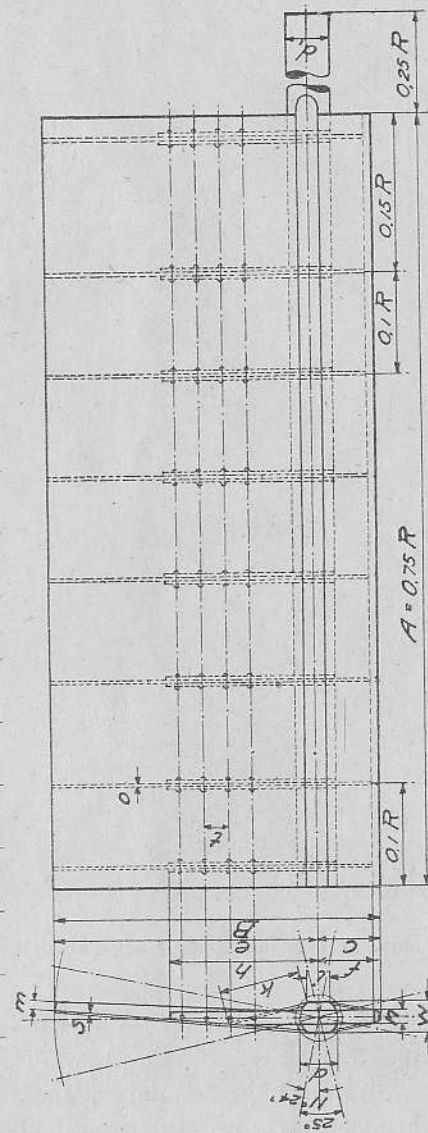
Joon. 70.  
Pöördpindadega neljapinnaline tiivik.

Need  $D = 20$  m läbimõõduga ca. 20-kW võimsusega tuulikud (joon. 70 ja 71) on määratud elektri tootmiseks ja on püstitatud prof. P. la Couri kavandi kohaselt. Nimetatute viimistlemisega ei ole kasutegurit nimetamisväärselt parandatud, on ainult muudetud automaatseks tiiviku tuulde juhita-  
vavus ja reguleeritavus.

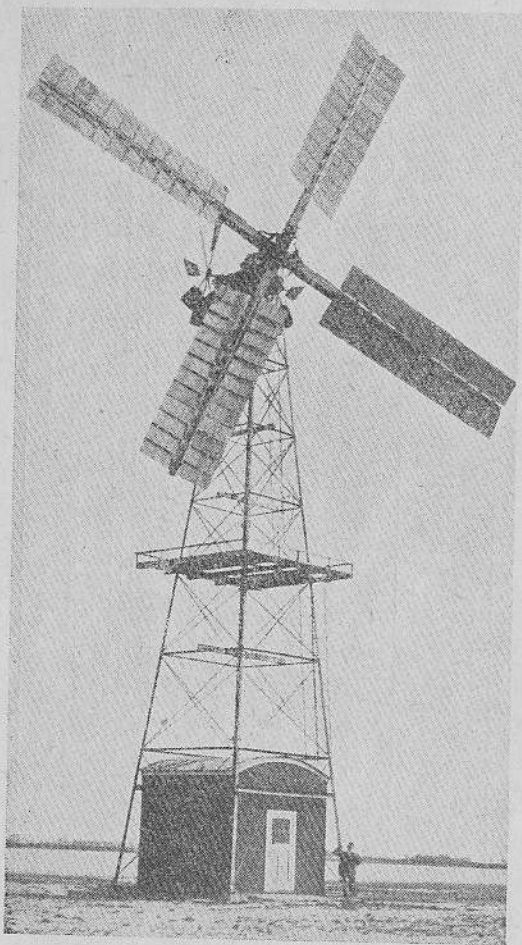
Tuulikute (joon. 68–71) madalat võimsuse kasutegurit  $\eta > 0,2$  ning pöördmomentide kasutegureid  $\eta_{mo} = 0,06$  ja  $\eta_{m \text{ maks.}} = 0,10$  põhjustavad tiibade tagaküljel õhu voolamist takistavad kodarad. Kodartakistuse kõrvaldamiseks ja tiibadele aerodünaamiliselt parema profiili loomiseks valmistatakse laudadega täielikult kaetud pinnad (tab. nr. 13 ühes sinna juurde kuuluva joonisega).

Tabel nr. 13.

D meetrites	A	B	C	e	f	h	m	n	õ	t	i	k	s	w	w <sub>0</sub>	d	d <sub>1</sub>
10	3750	1500	250	1250	235	615	25	40	17,5	112	100	335	7	100	125	148	190
12	4500	1800	300	1500	282	738	30	50	21	135	120	400	7	120	150	177	228
14	5250	2100	350	1750	329	860	35	60	24,5	158	140	465	7	143	175	206	266
16	6000	2400	400	2000	376	934	40	70	28	180	160	532	10	160	200	236	304
18	6750	2700	450	2250	422	1102	45	80	31,5	202	180	600	10	180	225	265	342
20	7500	3000	500	2500	470	1230	50	90	35	225	200	665	10	200	250	295	380







Joon. 71. Pöördpindadega neljapinnaline tiivik.

sele. Nii näeme joon. 72 Adleri tiivikut, mille kiirusemoodul  $k = 2,5$  kuni  $3,5$ .

Suurimat kiirust suudavad arendada propellertiivikud, milledest parimaks saavutuseks osutub joon. 73 kujutatud neljatiivaline tiivik.

Katsed nende tiibade mudeliga on andnud võimsuse kasutegur  $\eta = 0,31$  ja paigalt nihkumise või nn. algpöördmomendi kasuteguri  $\eta_{mo} = 0,115$  ja maksimaalse pöördmomendi kasuteguri

$$\eta_{m \text{ maks.}} = 0,18$$

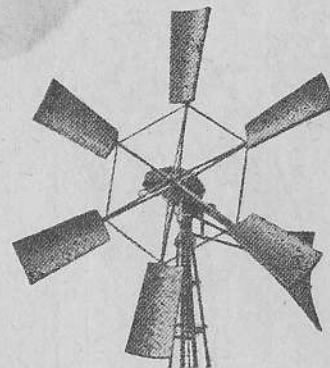
kiirusemooduli  $k = 2$  juures. Elektri tootmisel dünamot torni tippu asetastuulemootori konstruktsioon ühes torniga lihtsustub, sest siis jäävad ära transmisiioonid. Sealjuures dünamo käitamiseks vajalik suurem tiirude arv sunnib valima kiiresti jooksvate tiibadega tiiviku, mis soodustab tiiviku katvusastme vähendamist, mille tulemusena tiibade arv ja üldpind kujuneb väikeseks. Sealjuures tiibade profiilid olgu valitud vastavalt tiibade kiirusele.

Ka võimsuse kasutegur ( $\eta = 0,46$ ) ületab seniseid saavutusi. Selle tiiviku reguleerimisseadis erineb eelkirjeldatuist seega, et tiibade tagaküljele on kinnitatud Bilau-süsteemilised takistuspinna, mis normaalse tiirlemiskiiruse puhul asuvad tangentsiaal-asendis, vedrust tõmmatuna, toetudes vastu tuge (joon. 74). Ületades määratud tiirlemiskiiruse, takistuspinna pöörduvad tsentrifugaaljõu mõjul radiaalasendisse, põhjustades seega küllaldast takistust, et isegi suurte tormide puhul tiirlemiskiirus ei ületaks lubatavat piiri.

Kahetiivalised lihtsad propellertiivikud osutuvad kohasteks väiksemate akumulaatorite laadimisel. Uhte neist, tiibadest käitavat mootor-generaatorit, kujutab joonis 75.

Reguleerumine toimub tiibade pöörlemisel radiaaltelje ümber, kusjuures tiiviku kapslis asuv vedruga seadis hoiab tiivad töövalmis põiki tuult, ja tuul, mille tugevus ületab optimaalse piiri, surub tiivad serviti. Üksiktiiba kujutab joon. 76.

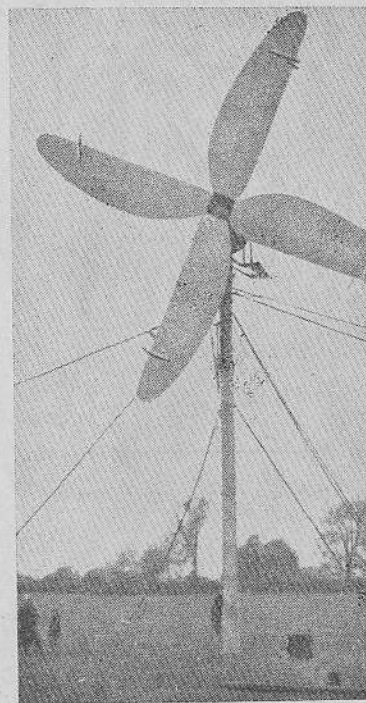
Samaks otstarbeks määratud tuulemootorit, mille reguleerumine toimub aga kogu tiiviku ja dünamo



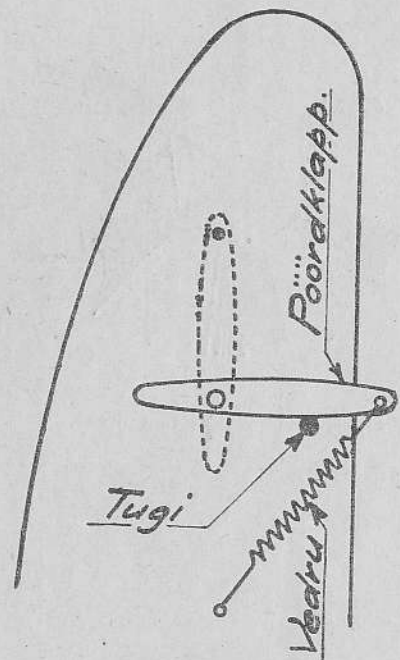
$$k = 2,5 - 3,5$$

Joon. 72.

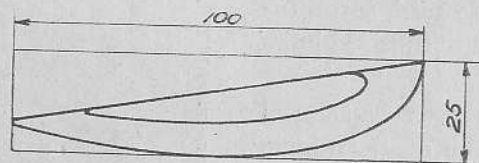
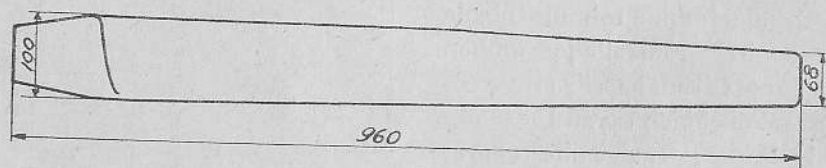
Adleri tiivik elektri tootmiseks.



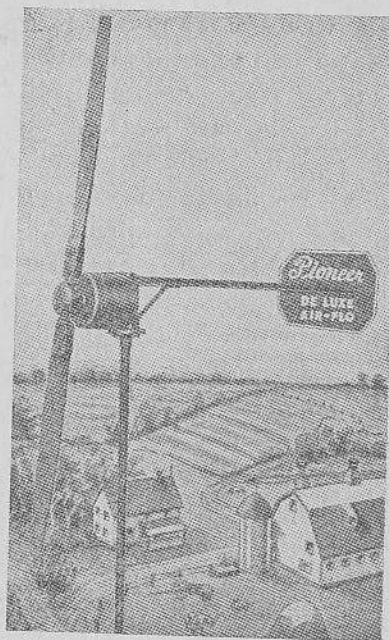
Joon. 73. Elektri tootmiseks.



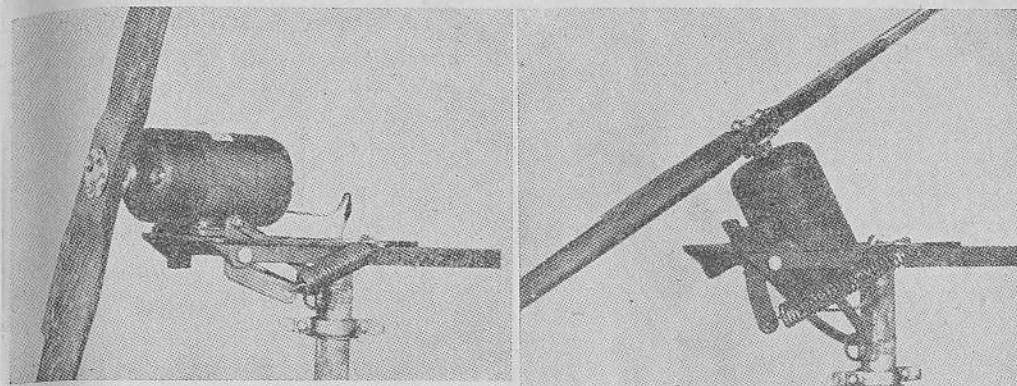
Joon. 74. Bilau-süsteemiline pöördklapp-regulaator.



Joon. 76. Tuulemootori tüü.



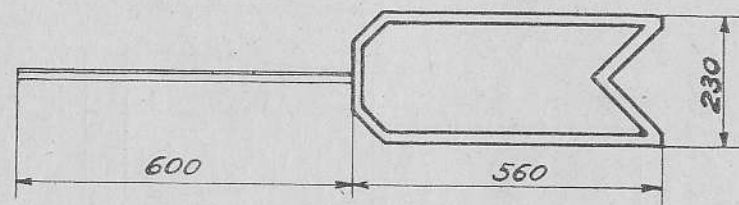
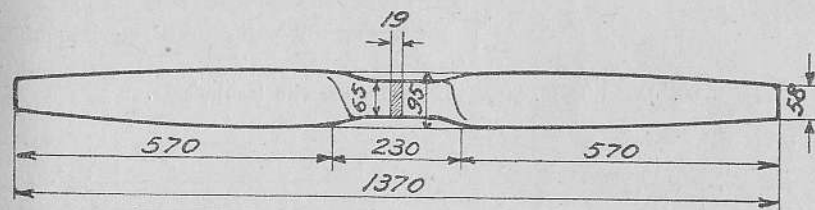
Joon. 75. Tuulemootor.  $D = 2,13$  m. 150 vatti. Akumulaatori laadimiseks.



Joon. 77. Töös.

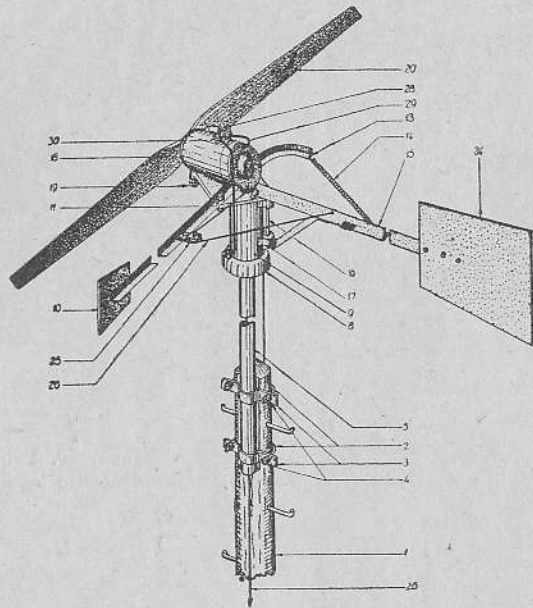
Joon. 78. Välja lülitatud.

Tuulemootor  $D = 1,37$  m. 30 vatti, Akumulaatorite laadimiseks.

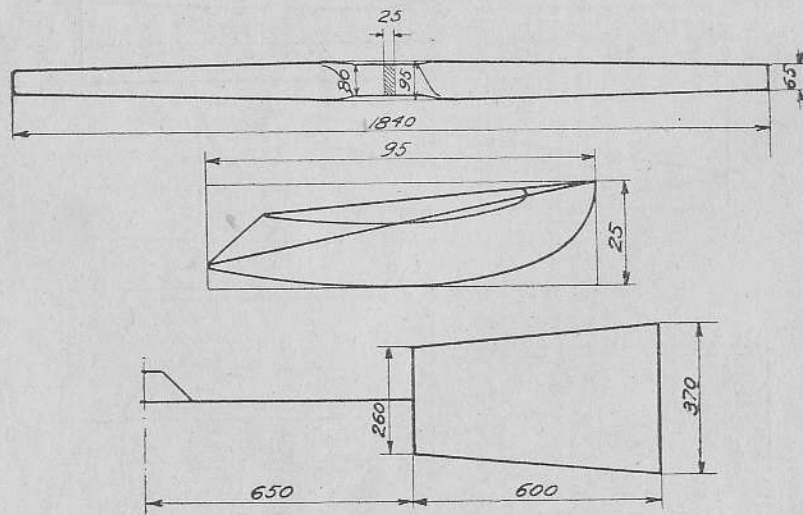


Joon. 79. Tiivik ja lipp.





Joon. 80.  $D = 1,84$  m. 90 vatti. Akumulaatorite laadimiseks.



Joon. 81. Tiivik ja lipp

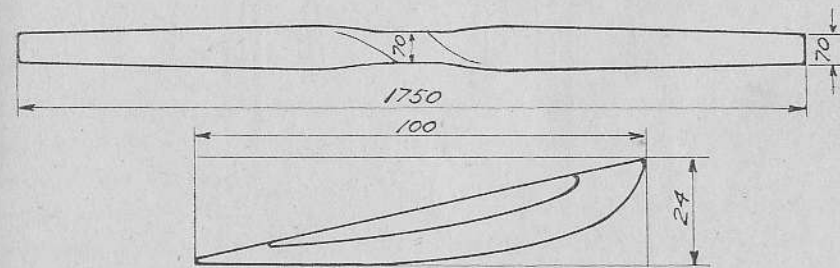
kaldumisega liigse tuule survele tagaküljele, kujutavad joon. 77 (töövalmina) ja joon. 78 (väljalülitatuna). Tiiva ja lipu moodud on antud joon. 79.

Joon. 80 kujutab „VEF“ tuulegeneraatorit ja üksikosi joon. 81. Reguleerumine eklipsüsteemiline.

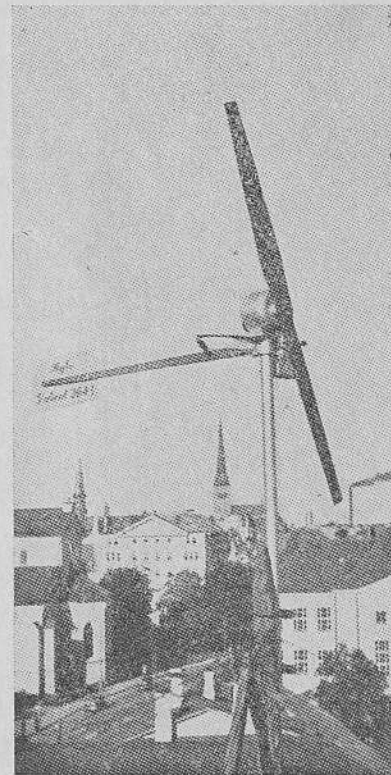
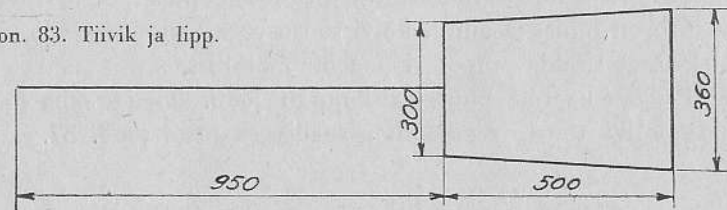
Joon. 82 kujutab „Aglo“ tuulemootorit ja üksikosi joon. 83.

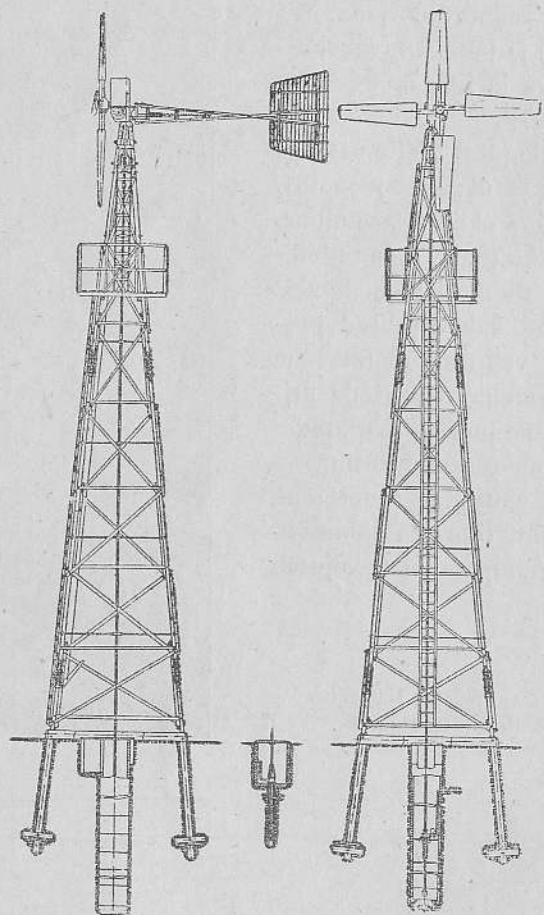
Eeltoodud kahekiivalised propellerid on valmistatud puust ja neid on võimalik valmistada primitiivsete abinõudega. Kasutades puud tuulemootorite ehitusmaterjalina on ehitatud mootoreid, milledest üht, tiibratta läbimõõduga 5 m (pumpamiseks), kujutab joon. 84.

Joon. 82.  $D = 1,75$  m. 120 vatti. Akumulaatorite laadimiseks.



Joon. 83. Tiivik ja lipp.

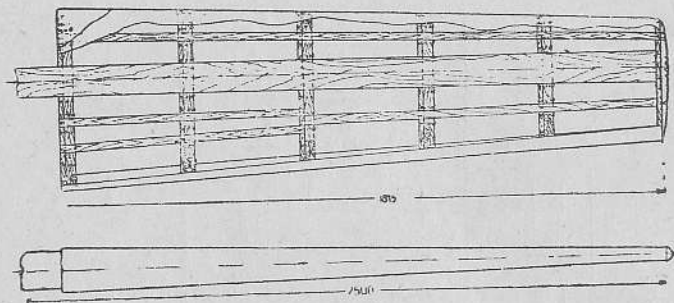




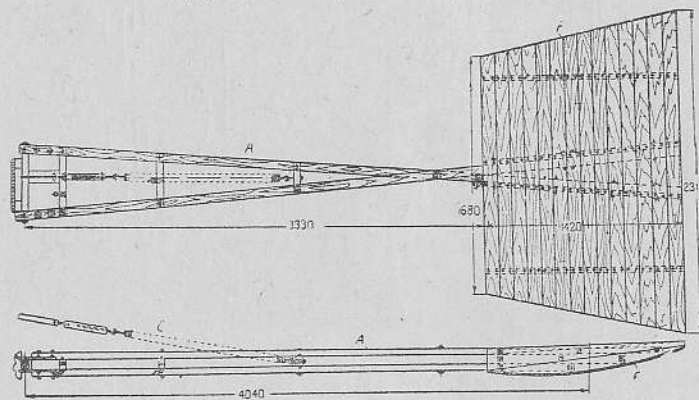
Joon. 84. Puust tuulemootor.

See mootor on valmistatud peamiselt puust, s. o. tiivik, saba ja torn on puust ja ainult kolvi tõusu reguleerimise seadist ja tigu-ülekanne sisaldav mootori pea on metallist.

Plekiga kaetud puutiiba kujutab joon. 85 ja saba joon. 86, ning kolvi tõusu reguleeriva seadisega pead joon. 87.



Joon. 85. Plekiga kaetud puutiib.

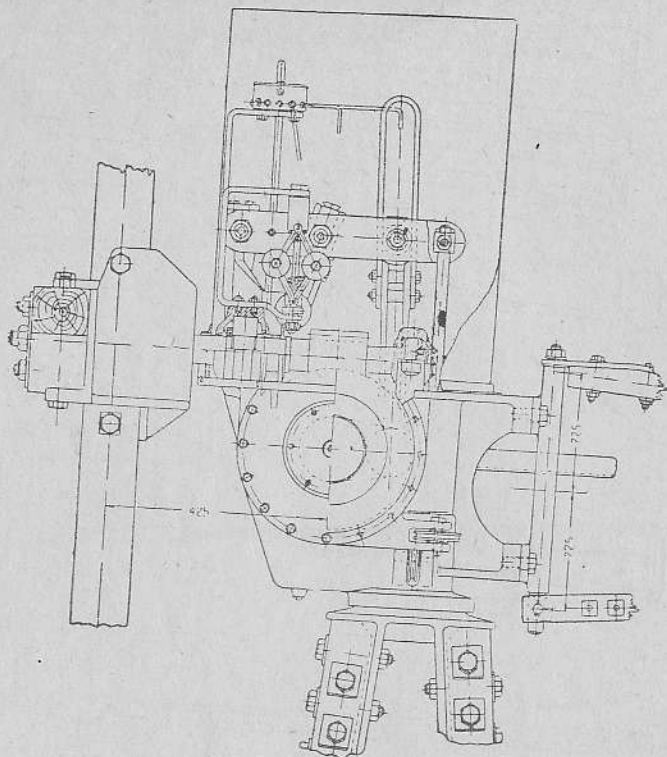


Joon. 86. Plekiga kaetud puulipp.

See 5-m tiivikuläbimõõduga mootor arendab 8 m/sek. tuulekiirusel 3 hobujõudu, tehes 180 tiiru minutis. Reguleerumine toimub eklipssüsteemi järgi.

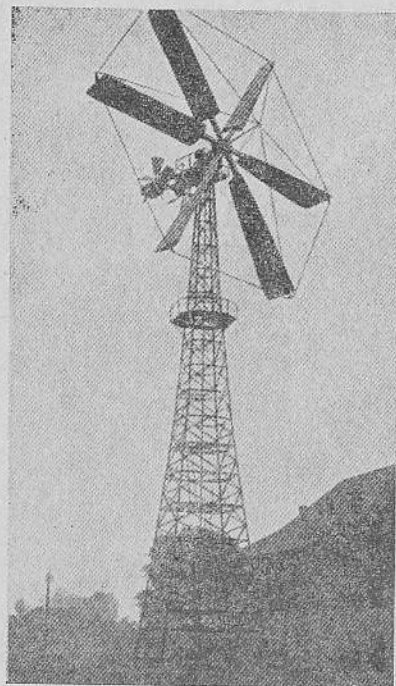
Et kiiresti tiirleva tiiviku algpöördmoment on väike ja seetõttu nõrgema tuule puhul ei ole suuteline koormatult pöörlemist alustama, siis varustatakse eriti pumpamiseks määratavad mootorid säärase seadisega, mis mootori tiirlemise kiiruse kahanemisel kahan-dab koormat. Neid nõudeid rahuldab joon. 87 toodud seadis, mis koosneb tiguülekandest tiibrattalt väntvõllile (1:6) ja pumbavarda käigu reguleerijast tsentrifugaalregulaatorist.





Joon. 87. Ulekandeseadis.

Joon. 75 tuulegeneraatorile reguleerivuselt sarnanevat tuulemootorit kujutab joon. 88. Tuulemootor  $D=20$  m, kasutatakse elektri tootmiseks (26/34 kW) ja veski käitamiseks. Torni puhul selle mootori tiiviku radiaalsetel telgedel pöörduvad tiivad juhitakse tuulest ära vastukaalu abil, ja tuultest olenevaid tiirude arvu muutusi tasandab tsentrifugaalregulaator, mis on tiivikuga ühenduses vastava trossi kaudu ja vintsiga (joon. 89). Ühtlasi see regulaator hoiab ära juhtumid, kus veorihmade äralangemisel või tiivikust käitatava dünamo voolu katkestamisel koormast järsku vabanev tiivik ohtlikult kiiresti tiirlema võib hakata. Tiibratta tuulde juhtimine toimub seadrosidega. Tiiviku kiiirusmoodul  $k=3$ .

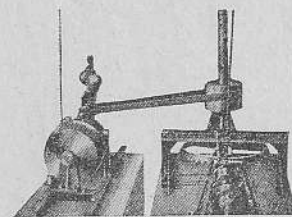


Joon. 88.

tiibade tuulest ärapööramiseks on kinnitatud tiibadele nn. stabilisaatorid.

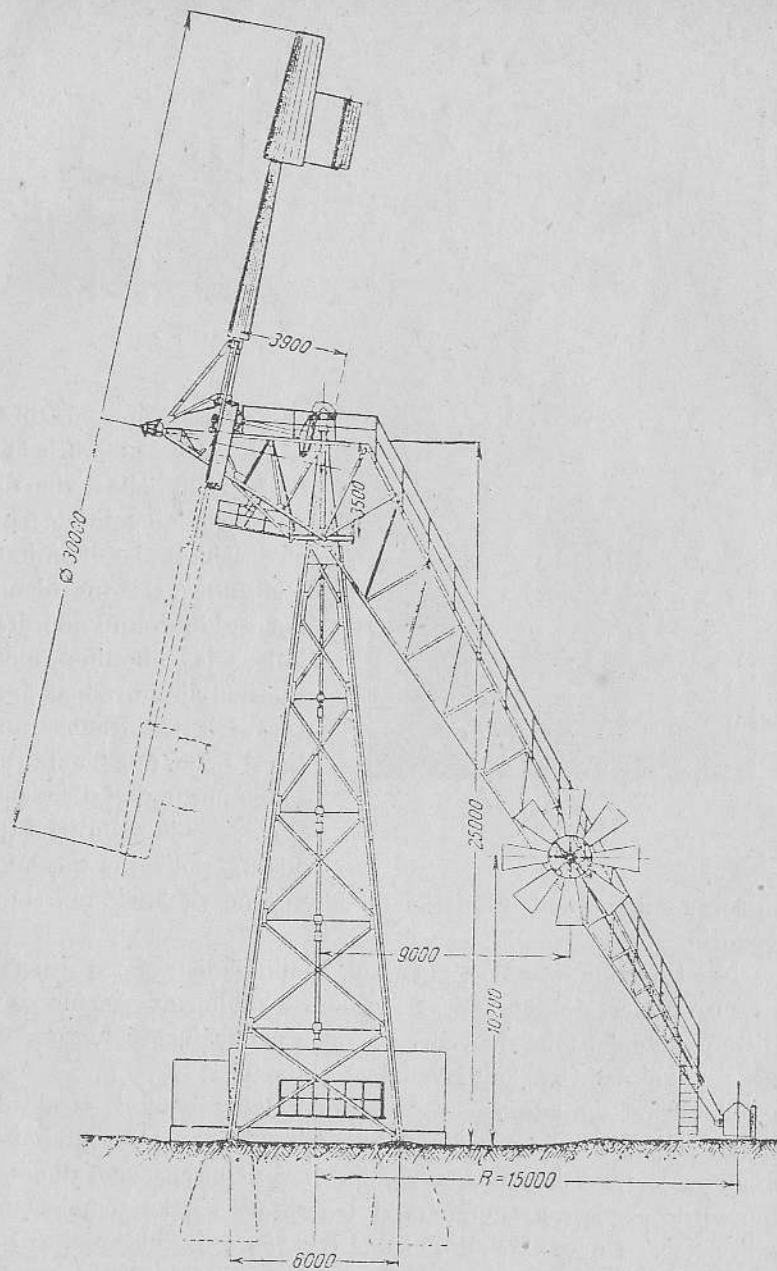
Need stabilisaatorid tegutsevad lisapindadena kogu tiiva või tiivaosa tuulest ärapööramiseks, kusjuures tuule surve reguleerimine tiiva pindadele toimub vedruga või vastukaaluga. Mootori tiiba ühes stabilisaatoriga kujutavad joon. 90–92.

Tuulejõu kasutamise probleemide lahendamisel ei piirduta tiibadele ja tiivikule aerodünaamiliselt sobivama kuju andmisega, mootori ja torni konstruktsioonide viimistlemisega, vaid tungitakse mootorile soodsama energiabaasi leidmiseks ka kõrgemasse õhukihtidesse. Kõrgemate õhukihtide tugevama ja ühtlasema tuule rakendamine on seoses torni ehitusega, mille ehitamise tasuvuse

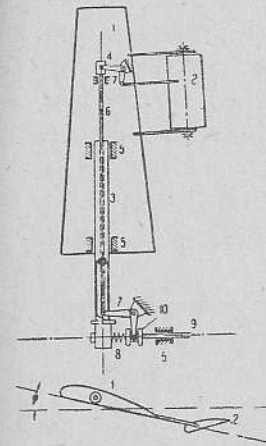


Joon. 89.

Eelmisest suurema tiibade läbimõõduga mootorit kujutab joon. 90. Selle tiiviku tuulde juhtimine toimub hanna ehk saba külge kinnitatud seadrosist. Hanna ülemine ots on kinnitatud pöördtanu külge ja alumine toetub sõõrikujulisele rööpale, nagu tavaliselt pöördtanuga tuulikutel (joon. 69). Tuule tugevuse muutumisel tiivad pöörduvad nagu eelmiselgi (joonis 88) radiaalsel teljel, kuid

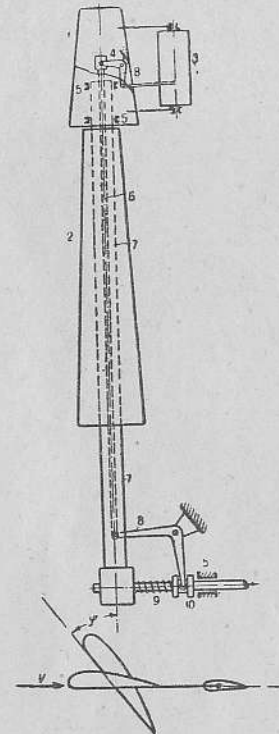


Joon. 90.  
Tuulemootor elektri tootmiseks.  $D = 30$  m. 100 kW.

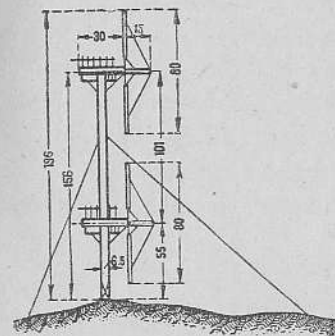


Joon. 91-a.

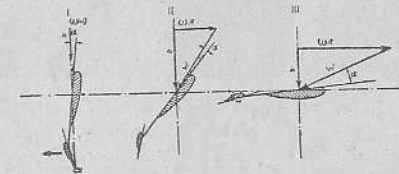
Joonised 91-a ja 91-b tiiba ja tiivaotsa pööravad stabliisaatorid.



Joon. 91-b.

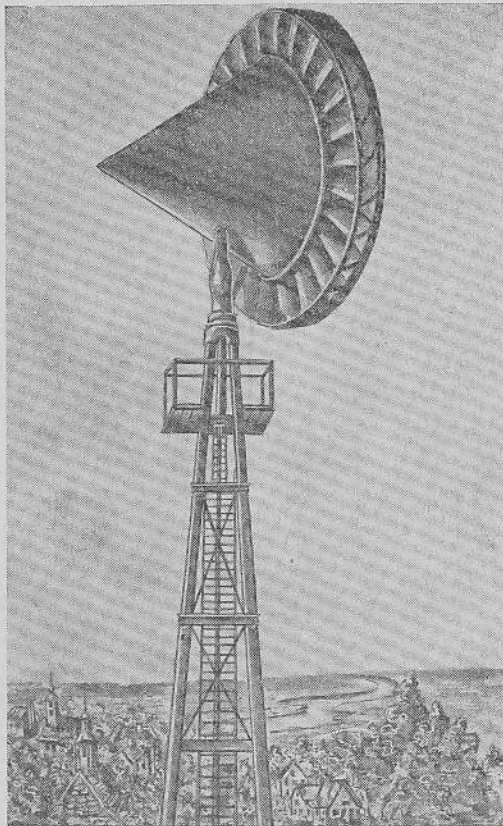


Joon. 93. Tuulemootori projekt elektrienergia tootmiseks  $2 \times (D = 80\text{m})$ ; 100 000 kW.

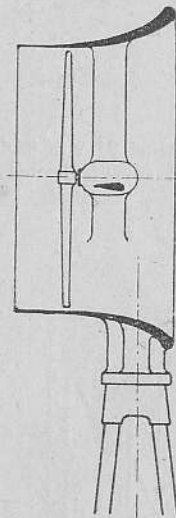


Joon. 92. Tiivapinna kolm asendit.





Joon. 94. Prof. Ellenhammeri tuuleturbiin elektritootmiseks.



Joon. 95.

eelduseks on suure võimsusega tuulemootor. Joon. 93 kujutab tuuleelektrijõujaama projekti, mille 80-m läbimõõduga tiivikuid kannab 156 m kõrgune torn. Üldvõimsus on 10 000 kW.

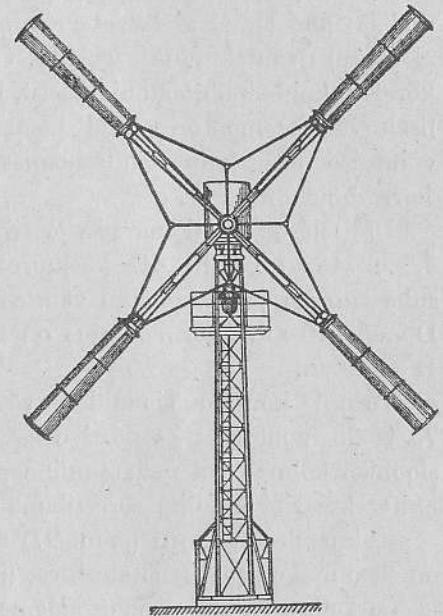
Eelmises projektis (joon. 93) näidatud tiivikute läbimõõte ületab Honnefi projekt, mille kohta andmed on toodud 1 osas, joon. 2. ja 3.

Mootori reguleerumine toimub tiivikute kandekonstruktsiooni ettepoole kaldumisega (võrdle joon. 78).

Eeltooduist erineva konstruktsiooniga prof. Ellenhammeri tuuleturbiini kujutab joon. 94, mille tiiviku sisemise pinna kooniline kate juhib tuule keskelt tiibadele.

Vastupidi eelmisele juhitakse joon. 95 tuul tiibadele Korti düüsi abil. Sellega on võimalik tõsta tiiviku kasutegurit.

Fletneri rootori kui pinna kasutamist tuulemootori tiivana vaatlesime eespool. Seal kirjeldatud rootoreist võime kujundada joon. 96 näidatud tiiviku. Et aga säärane tiivik osutub ebaratsionaalseks, siis me selle juures pikemalt ei peatu.



Joon. 96.

### c. Tornid.

Nagu eespool (2-c) tähendatud, sõltub tuule kiirus maapinna reljeefist ja kõrgusest, mida iseloomustavad tab. 4 toodud andmed ja joon. 15 ja 16. Kõverjoonest (joon. 16) nähtub, et 10 m kõrguseni tuule kiiruse juurdekasv on suurem kui järgnevatel kõrgustel, ja kui arvestada asjaolu, et kõrgemate õhukihtide liikumine on ühtlasem, tuleks mootori tiivik maapinnast vähemalt 10 m kõrgusele

paigutada. Seejuures arvestada ümbritsevaid esemeid, nagu hooned, puud jms., millede kõrgus 200–300 m kauguses ei ületaks mootori kõrgust, vaid jääksid vähemalt paar meetrit allapoole tiiviku alumist serva. Ühtlasi tähele panna ka seda, et neist piiridest lähemal ja madalamal asetsevate esemete kontuurid (näiteks katused) ei osutuks tuule suuna segajaiks. On soovitatav mootoreid asetada kõrgele, kuid hoidutagu liialdusist, ja seda kahel põhjusel: 1) suhteliselt väikese mootori puhul liiga kõrge torn põhjustab mootori võimsuse üksushinna suurenemist ja 2) mootori järelevalve ja korrashoid on raske.

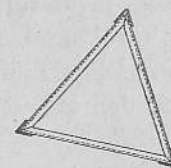
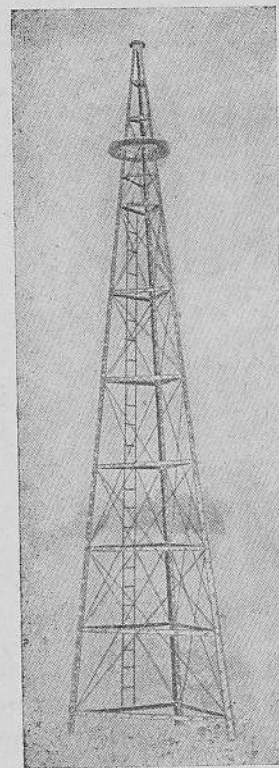
Üldiselt on torni kõrguse ja tiiviku läbimõõdu suhe 1,5 kuni 4, s.o.  $H = 1,5$  kuni  $4D$ , kusjuures väiksematel mootoritel on see suhe suurem ja suurematel väiksem. Näiteks tiivikule läbimõõduga  $D = 3$  m sobiva torni kõrgus on  $H = 12$  m ja  $D = 20$  m puhul  $H = 30$  m.

Tornide konstruktsioonid on väga erinevad. Nii näeme joon. 73, 75 ja 93 mootoreid ka posti otsas. Üldiselt on tornide konstruktsiooniks kolme- või neljatahuline püramiidsõrestik. Suured tornid ehitatakse ringikujulise sõrestikuna (joon. 2 ja 88).

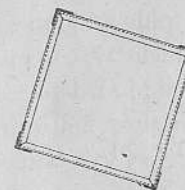
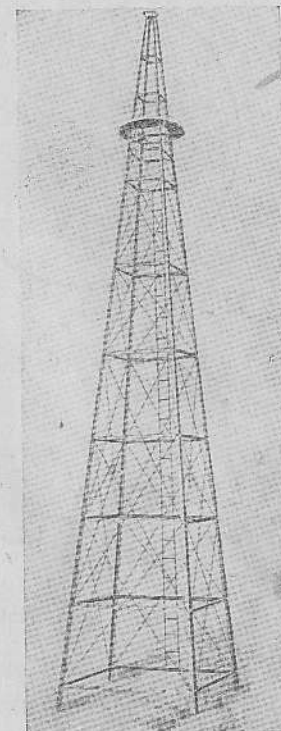
Kolmetahuline torn (joon. 97) sisaldab küll vähem üksikosi ja on kaalult kergem neljatahulisest (joon. 98), kuid selle  $60^\circ$  nurkade ja nurkades põikraudadele sidemete valmistamine on tülikam. Neljatahulised tornid võimaldavad ka paremini veereservuaari torni mahutada (joon. 58 ja 61).

Torni sõrestiku valmistamisel tarvitatakse võimalikult õhemaseinalist ja laiemaküljelist nurkrauda põhjusel, et kruviaugud vähem nõrgestaksid põiklõikepinda ja nurkraua inertsmomenti. Sellepärast ameeriklased tarvitavad tornide valmistamiseks plekist nurkraudu.

Sõrestiku projekteerimisel langeb pearõhk torni montaažile. Torne monteeritakse horisontaalasendis ja seejärel püsti tõstes, või püstasendis üksikosi järjekorras monteerides. Püstasendis monteerimine osutub paratamatuks torni hoone laele püstitamisel. Torni põikraudade vahed torni telje suunas valida kahe meetri piirides nii, et torni külgraudade otstes jätkuosa ulatuks üle põikraua. Külg- ja põikraudade sõlmpunktides on võimalik ka diago-



Joon. 97. Kolmeküljeline torn.

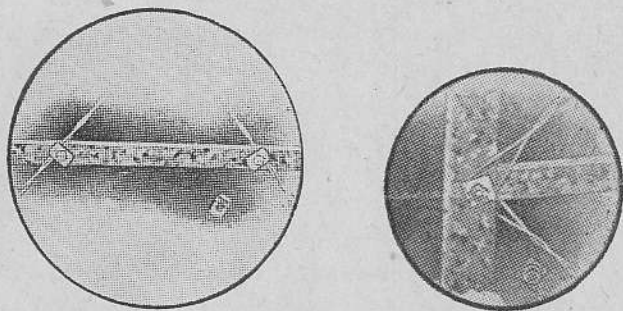


Joon. 98. Neljaküljeline torn.

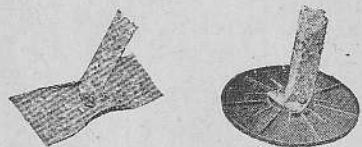
naale kinnitada. Diagonaalid valmistatakse kahekordselt keerutatud traadist (joon. 99 ja 100) või ümarrauast silmustega otstes.

Plekist painutatud nurkraudadest ja traadist diagonaalidega torni konstruktsiooni kujutab joon. 102, kus sõõriga on piiratud sideme kohad.





Joon. 99. ja 100. Traadist-diagonaalide sidemed.

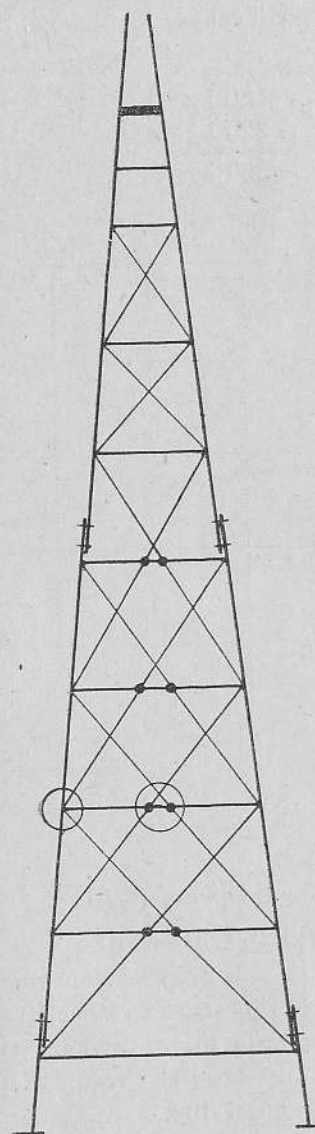


Joon. 101. Ankurtallad.

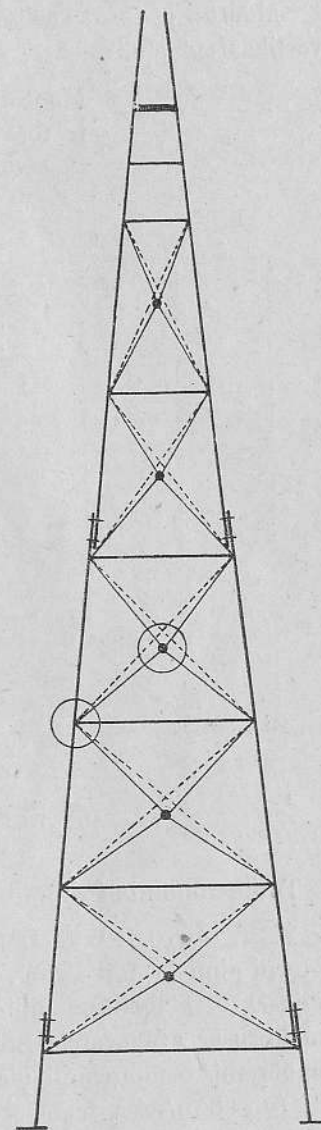
Nurkraudadest torni konstruktsiooni kujutab joon. 103. Diagonaalid valmistatakse ümarrauast ja pingutatakse pingutusrosettidega. Pingutamata diagonaalidega (märgitud joon. 103 katkendjoonega) torn on nn. „vedel“ ja peale rosettidest pingutamist (märgitud pideva joonega) muutub stabiilseks, ja tornile mõjuvatele jõududele vastupanemisest võtavad kõik torni osad ühtlaselt osa. Mootorile juurdepääsuks varustatakse torn redeliga, mille astme kõrgus valitakse 250 mm ja laius 300 mm. Redeli küljed valmistatakse  $1\frac{1}{4}'' \times 1\frac{1}{4}''$  lame- ja astmed  $\frac{1}{2}''$  ümarrauast.

Torni jalgade külge kinnitatud ankurtallad on vajalikud maasse müürimisel või hoone lae talade külge kinnitamiseks (joon. 101). Jalgade vahe ja torni kõrguse vahekord valitakse 1:4–4,6.

Torni tugevuse ja stabiilsuse arvutamise näiteks toome  $D = 3$  m tiibratta läbimõõduga mootori, tuginedes  $H = 12$  m tornile, mille jalgade vahe  $B = 2,8$  m. Torn peab olema suuteline mootorit ja torni kandma ja tuule rõhumisele vastu pidama.



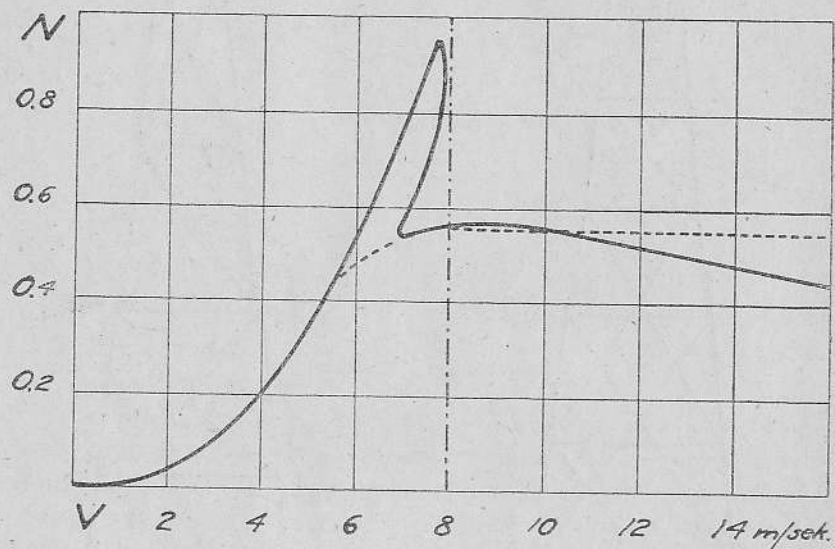
Joon. 102.  
Plekist torni konstruktsioon.



Joon. 103.  
Nurkraudadest torni konstruktsioon.

Mootori ja torni kaalud mõjuvad vertikaalsete jõududena. Seega vertikaalsed jõud:

Mootori kaal  $G_1 = 180 \text{ kg}$   
 ja torni kaal  $G_2 = 320 \text{ kg}$   
 Kokku:  $G = 500 \text{ kg}$

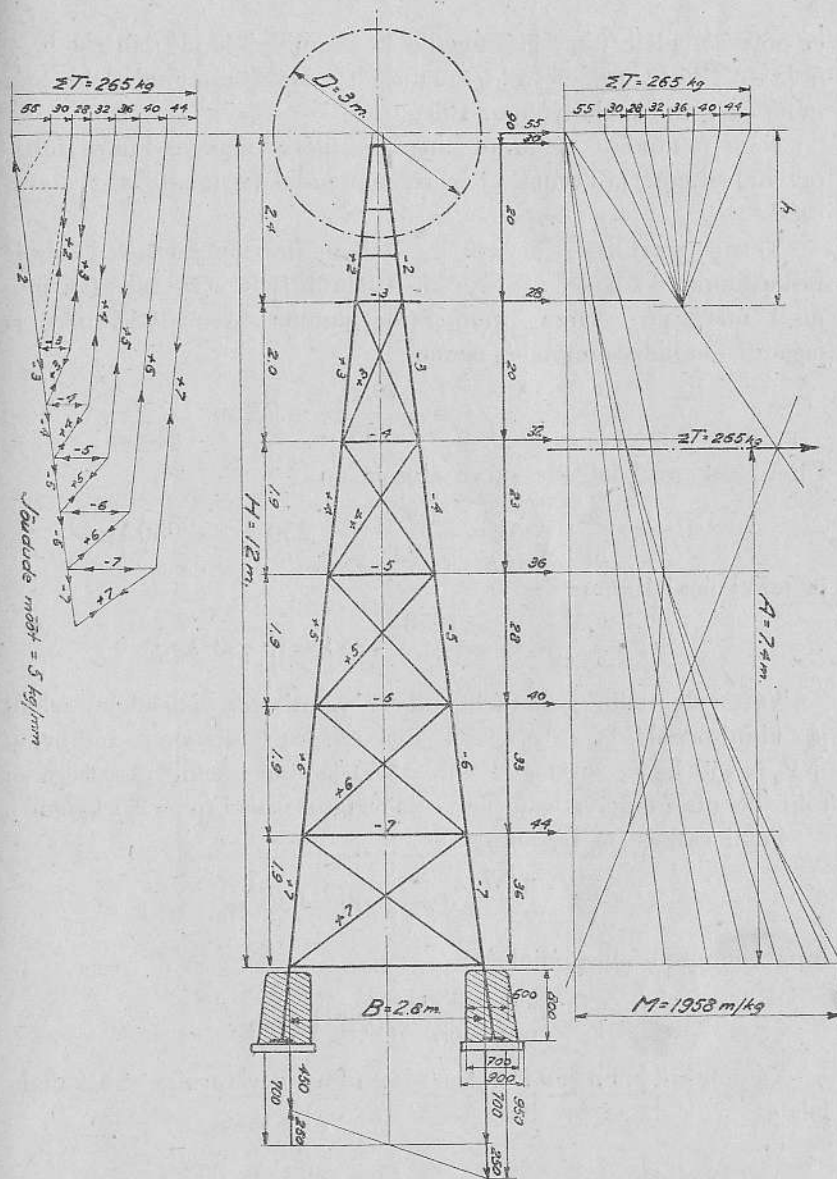


Joon. 104. Tuulemootori võimsuse diagramm.

Tuule rõhumine tiibrattale horisontaalse jõuna (v. 81)

$T_0 = \eta \cdot 0,049 \cdot v^2 \cdot D^2 = 0,35 \cdot 0,049 \cdot 27^2 \cdot 3^2 = 110 \text{ kg}$   
 ja torni pinnale  $150 \text{ kg/m}^2$ . Tuule kiirus  $v = 27 \text{ m/sec.}$  on võetud põhjusel, et eklipssüsteemiline reguleeriv tiibratas ei reageeri vajaliku kiirusega tugevatele tuulepuhangutele ja surve tiivikule võib ärapööramise momendil ületada 3- kuni 4-kordselt reguleerivuse piiri ( $v = 8 \text{ m/sec.}$ ), nagu see nähtub joonisel 104.

Ulaltoodud arvud on kantud tab. 14, lahter 1 ja 2, ning on arvutatud ühele torni poolele. Selle järgi määrame graafiliselt püst-



Joon. 105. Sõrestikus esinevate jõudude määramine graafiliselt.



ja põikraudadele ning diagonaalidele sisemised jõud (lahtrid 3, 4, 5 ja 6). Püstrauas oleval graafiliselt määratud jõududele liita mootori torni kaalud (joon. 105).

Neist jõududest olenevad pinged ei ületa lubatavaid piire (lubatav 750 kg/cm<sup>2</sup>) ja arvatud inertsomendid on lubatavaist suuremad.

Torni graafilisel arvutusel saame horisontaalsete jõudude raskuspunkti kauguse A = 7,4 m. Analüütiliselt arvutades (ka joonisel märgitud) saame momentide summa M = 1958 mkp ja jagades jõudude summale, saame

$$A = \frac{M}{\sum T} = \frac{1958}{265} = 7,4 \text{ m.}$$

Uhel pool torni jalgade surve alusele on

$$-P_1 = \frac{M}{B} + G = \frac{1958}{2,8} + 250 = -950 \text{ kg}$$

ja teisel pool tõmme

$$+P_2 = \frac{M}{B} - G = \frac{1958}{2,8} - 250 = +450 \text{ kg.}$$

Vastavalt neile jõududele tuleks valmistada jalgadele soklid ja kinnituspoldid, s. o. sokli raskus peab ületama tõmbejõu +P<sub>2</sub> = 450 kg ja survejõud -P<sub>1</sub> = 950 kg ühes sokli raskusega ei tohi ületada lubatavat aluspinna koormatuse piiri (p = 2,5 kg/cm<sup>2</sup>).

Sokli raskus on tegelikult

$$G = \left( \frac{0,6 + 0,7}{2} \right) \cdot 0,8 \cdot 1600 = 830 \text{ kg}$$

ning rõhumine aluspinnale on

$$p = \frac{950 + 830}{900 \cdot 900} = 0,22 \text{ kg/cm}^2.$$

Käesoleval juhul jõud olid arvatud poolele tornile, s. o. kahele jalale.

Tabel 14.

Nr.	Jõud		Graafiliselt määr. jõud				Püstrauas						Põikraud		Diagon.						
	vert.	hor.	Püstrauas surve tõmbe	Põik. Diagon.	Tõmbe	Surve	Surve Tõmbe	Nurk.	F	Pinged	Inerts o.	Surve-pinge	Inerts.	Tõmbe-pinge	Ø	F					
	G	T	-T <sub>1</sub>	-T <sub>2</sub>	-T <sub>3</sub>	-T <sub>4</sub>	G	-P <sub>1</sub>	-P <sub>2</sub>	T <sub>1</sub> +G	T <sub>2</sub> -G	T <sub>1</sub> +P <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> -G	Surve	Inerts	Tõmbe					
	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	90	55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	20	30	305	305	70	—	110	415	195	2 × 3,28	4,36	95	45	4,98	—	7,12	16,0	1,01	88	—	
3	20	28	385	305	46	90	130	515	175	—	—	118	40	5,15	—	—	10,5	0,46	—	—	
4	23	32	465	385	60	95	153	618	243	35 × 5	—	142	56	5,56	—	—	13,8	0,54	—	—	
5	28	36	540	465	80	105	181	721	284	40 × 5	—	134	53	6,50	—	—	14,8	0,72	—	—	
6	33	40	625	540	100	125	214	839	331	2 × 3,79	—	156	62	7,45	—	—	18,6	0,90	—	—	
7	36	44	710	625	130	145	250	960	475	—	—	178	89	9,63	—	—	24,2	1,17	—	—	
Σ	250	265																			

## 6. Tuule-energia rakendamisest.

### a. Otstarbeka tuulemootori tüübi valimine.

Tuulemootori konstruktsiooni valikul tuleb kõigepealt silmas pidada ökonoomsuse põhimõtteid, s. t. tuulemootor peab võimalikult väikeste tootmiskuludega ära kasutama võimalikult suure hulga tuule-energiat. See oleneb peamiselt sellest, kuivõrd tootmistehnilisel teostamisel on arvestatud aerodünaamilisi kaalutlusi.

Põhilisi tiivikukonstruktsioone (joon. 106) vaadeldes nähtub, et Savoniuse rooriga (1) on lahendatud vertikaalse teljega trummel-tüübilise tuulemootori idee sel teel, et ka vastu tuult liikuvat tiiba on kasutatud tuule-energia rakendamiseks, mille tõttu see tiivik rahuldab tootmistehnilisi nõudeid ja on üks paremaid väiksemajooliste vertikaalse teljega tuulemootorite rühmas (näiteks rootor-ventilaatorid).

Hollandi tuulikust arenesid aeglaselt tiirlevad tuuleroosid ja kiiresti jooksvad propeller-tuulemootorid (2). Tuuleroostüübiga avasid ameeriklased võimaluse tuule jõudu kasutada üksikmajapidamistes igapäevastel töödel, vesivarustuses jne. ja ka suuremate masinate käitamiseks. Tuuleroostüüp on kohandatud nõrkadele tuultele, millest olenevalt mootor kujunes suure katvusastmega aeglaselt jooksvaks tuulemootoriks.

Hilisemad katsed tuuleroostüübiga avaldavad rahuldavat kasutegurit ja suurt algpöördmomenti; viimane on vajalik nõrgas tuules töötavate tiivikute puhul.

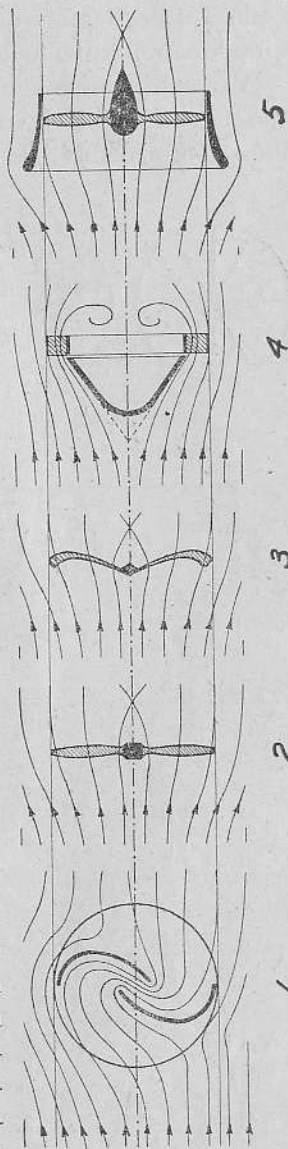
Tuulemootori aerodünaamilistel ja tootmistehnilistel kaalutlustel ja vajadusest kiiresti jooksvate mootorite järele kujunes väikese katvusastmega (v. 59) propellertüüp. Olenevalt kiirusemoodulist k propellertüübi võimsuse kasutegur võib ületada tuuleroosi kasuteguri, kuid sealjuures tema algpöördmoment on väga väike, mis on tingitud väikesest seadnurgast ja väikesest tiiva pinnast. Tuulerikastes piirkondades aitab väikese algmomenti puudumist leevendada tuule tugevus. Kiiresti jooksvaid propellertüüpi mootoreid kasutatakse peamiselt elektri tootmiseks ja nad osutuvad odavamaks tuulemootori tüübiks.

Soerenseni (3) labidakujuliste tiivaots-tega koonusekujulise tiivikuga mootori konstrueerimisel oli sihiks tiibade arvu vähendada, ühtlasi andes tiibadele säärase kuju, mis juhib tuule tiivaotstesse, et saada suuremat pöördmomenti. Selle tüübi aluseks on nähtus, et tuule erisurve kitsale pinnale on suurem kui laiale pinnale. Näiteks paiskab torm vahedega (lattidest) aia hõlpsamini ümber kui tiheda laudadest aia. Sel põhimõttel on purjesse aukude tegemisega püütud suurendada survet purjele.

Eeltooduga põhjendades tegi taani prof. P. la Cour katseid nelja tiiviku mudeliga (joon. 107), millest selgus, et koonusekujuline tiivik on (võrdse läbimõõduga) ventokraadist 700%, 2,8 korda suuremast tuuleroosist 33,3% ja 71% väiksemast vanast Soerenseni tiivikust 29% suurema võimsusega.

	Tiiva pind cm		
7440	2976	1116	1188
Võimsus mkg/sek.			
1,59	1,77	1,81	2,34

Võrreldes üksteisega Soerenseni tuulemootori (joon. 66 ja 67), tuuleroos- (joon. 61 ja 63) ja propellertüüpi (joon. 82 ja 88) näeme, et neist kõige lihtsam ja seega väiksemate tootmis- ja korrashoiukuludega on propellertüüp. Klappidest reguleeritavate tiibadega Soerenseni mootori kasutamiskulud on kõige suuremad ja katvusastme vähendamise loodetud tulu ei kata eelnimetatud kulu.

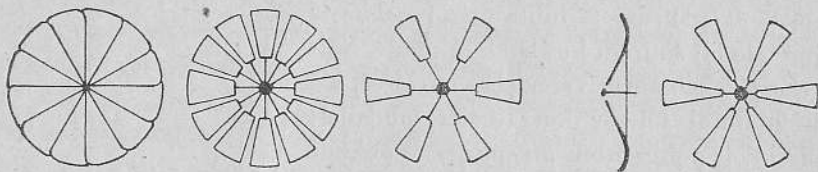


Joon. 106.

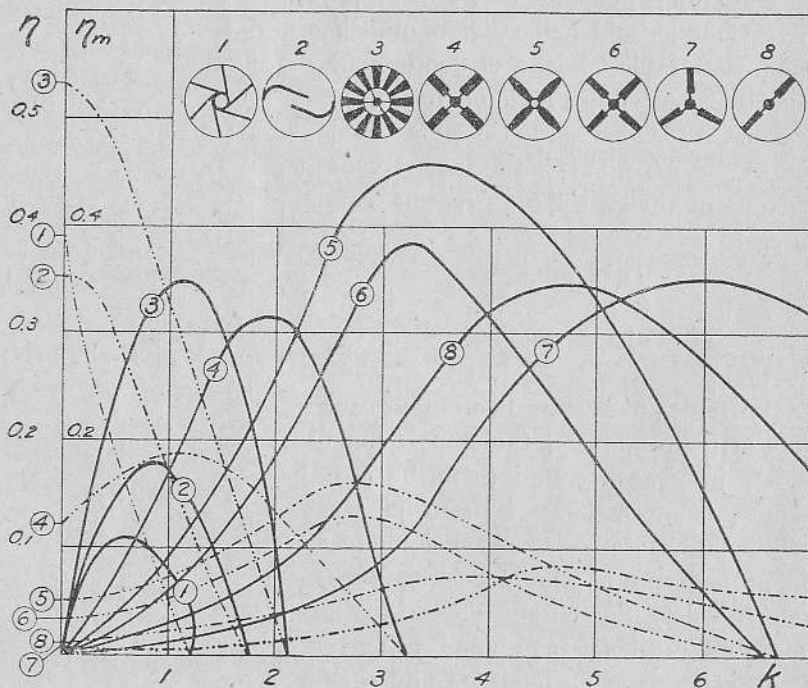


Prof. Ellenhammeri (4) koonilise keskpinnaga turbiinil (joon. 94) juhitakse tuult tiiviku välisringil asuvaile tiibadele.

Varustades tiiviku Korti (5) düüsiga (joon. 95-5) on võimalik suurendada mootori võimsust 5% võrra. Kuid kas see 5% ka düüsi tootmiskulusid katab, on küsitav.

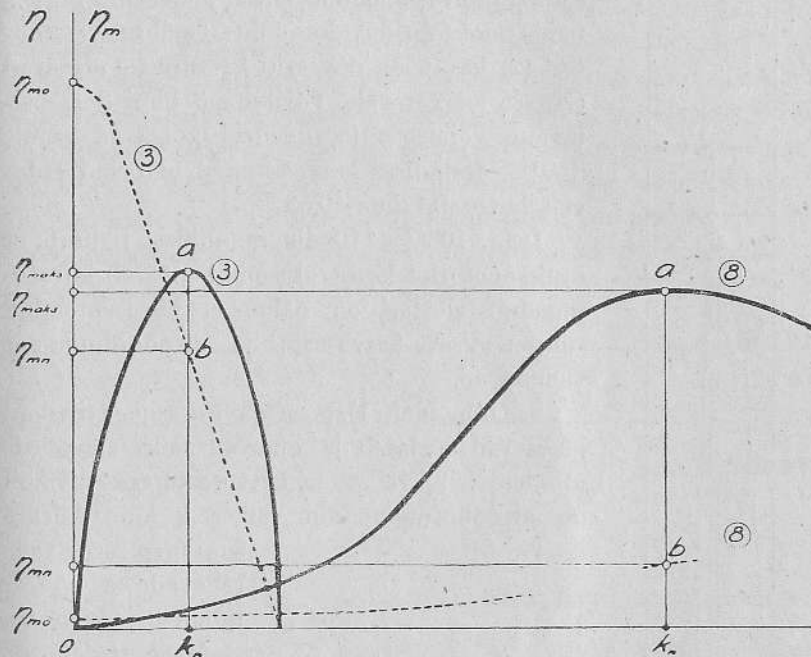


Joon. 107.



Joon. 108. — võimsuse kasutegur, - - - - - pöördmomendi kasutegur.

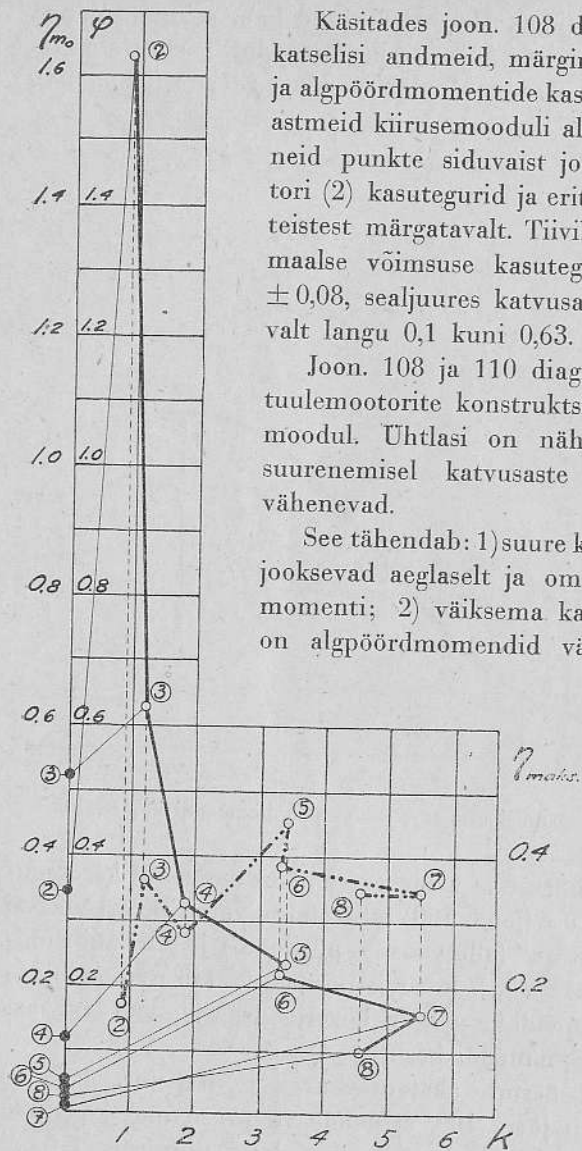
Neist viiest lügist (joon. 106) on levinud kaks esimest. Võttes vaatlusele mõlema katvusastmest ja kiirusemoodulist sõltuvaid erinevusi, kõrvutame kaheksa võrdse läbimõõduga tiivikut (joon. 108).



Joon. 109. — võimsuse kasutegur, - - - - - pöördmomendi kasutegur.

Maksimaalset võimsust ja samaaegset pöördmomendi kasuteguri üksteisest sõltuvust (joon. 109) määratakse võimsuse kasuteguri kõverjoone haritäpist „a” (alla vedades püstloodis joont kuni põhijooneni), millel punkt „ $k_n$ ” määrab normaalse kiirusemooduli ja lõikumisel pöördmomendi kasuteguri kõverjoonega punktis „b” saame normaalse pöördmomendi kasuteguri  $\eta_{mn}$ .

Võrreldes kahe äärmise katvusastmega tiiviku (nr. 3 ja 8) kasutegureid, nähtub joon. 109, et nende võimsuse maksimaalsete kasutegurite ( $\eta_{maks.}$ ) vahe ei ole nii suur, kuid normaalseil ( $\eta_{mn}$ ) ja eriti algpöördmomentidel ( $\eta_{mo}$ ) on väga suur.



Joon. 110. — katvusaste, - - - - - võimsuse kasutegur,

Käsitades joon. 108 diagrammidena toodud katselisi andmeid, märgime tiivikute võimsuse ja algpöördmomentide kasutegureid ning katvusasteid kiirusemooduli alusel joonisele 110, siis neid punkte siduvaist joontest nähtub, et rootori (2) kasutegurid ja eriti katvusaste erinevad teistest märgatavalt. Tiivikute 3 kuni 8 maksimaalse võimsuse kasutegurid kõiguvad ainult  $\pm 0,08$ , sealjuures katvusastmed näitavad pidevalt langu 0,1 kuni 0,63.

Joon. 108 ja 110 diagrammidest nähtub, et tuulemootorite konstruktsiooni määrab kiirusemoodul. Ühtlasi on näha, et kiirusemooduli suurenemisel katvusaste ja algpöördmoment vähenevad.

See tähendab: 1) suure katvusastmega tiivikud jooksevad aeglaselt ja omavad suurt algpöördmomenti; 2) väiksema katvusastmega tiivikuil on algpöördmomentid väikesed, kuid kiiruse

suurenemisega suurenevad ka pöördmoment ja võimsus.

Meelde tuletades, et pöörlemist alustavat või paigalt nihkumise momenti nimetatakse algpöördmomentiks ja normaalseks pöördmomentiks nimetame momenti, mis tiivik annab maksimaalse võimsusega tiireldes, siis pälvib seejuures erilist tä-

helepanu algpöördmoment. Väikese kiirusemooduliga mootor võib alustada tegevust täiskoormaga. Seda võimaldab tiibade suur seadnurk ja suur tiibade pind (suur katvusaste), mis annavad suure algpöördmomenti. Sellel on eriline tähtsus neis piirkondades, kus on ülekaalus nõrgad tuuled. Seevastu suure kiirusemooduliga tiivik, mille tiibade väike seadnurk või väike tiibade pind annavad väikese algpöördmomenti, ei võimalda alustada tegevust täiskoormaga, vaid koormatakse vastavalt tiirlemiskiirusega arenenud pöördmomentile. Need sobivad elektridünamote, koormatusregulaatoritega pumpade jne. käitamiseks ja üldiselt tuulerohkeis piirkondadesse või kasutades tugevamaid ja ühtlasemaid tuuli kõrgemate tornide abil.

Tabel 15

Tiiviku nr.		2	3	4	5	6	7	8	
Kiirusemoodul	k	0,9	1,2	1,9	3,5	3,3	5,8	4,5	
Katvusaste	$\varphi$	1,63	0,63	0,33	0,23	0,21	0,16	0,10	
Kasutegurid	võimsuse	$\eta$	0,18	0,36	0,31	0,46	0,39	0,35	0,35
	norm. pöördm.	$\eta_{mn}$	0,2	0,3	0,163	0,131	0,115	0,061	0,078
	algpöördmom.	$\eta_{mo}$	0,350	0,530	0,120	0,050	0,025	0,008	0,010
Tiibade kiirus u m/sek.	Tuule kiirus v m/sek.	2	1,8	2,4	3,8				
		3	2,7	3,6	5,7	10,5	9,9		
		4	3,6	4,8	7,6	14,0	13,2	23,2	18,0
		6	5,4	7,2	11,4	21,0	19,8	34,8	27,0
		8	7,2	9,6	15,2	28,0	26,4	46,4	36,0
		10				35,0	33,0	58,0	45,0
		12				42,0	39,6	69,6	54,0
		14						81,2	63,0



Diagrammide (joon. 108 ja 110) andmeil on koostatud tab. 15, kus on märgitud tiivikute välisringi kiirused  $u$  vastavalt kiiruse-moodulile  $k$ , kui tuulekiirus  $v = 2$  kuni 14 m/sek. Tabel on lahutatud nelja gruppi, milledest nr. 2 (rootorit) on kohaseim rakendada keskmistel tuulekiirustel 2 kuni 8 m/sek., nr. 3 ja 4 — 4 kuni 8 m/sek., nr. 5 ja 6 kuni 12 m/sek. ja nr. 7 ja 8 kuni 14 m/sek.

Tab. 16 näidatud tuulemootorid on võrdse läbimõõduga  $D = 5$  m (tiirlemispind  $F$  on kohandatud  $D = 5$  m). Võrdleme nende tiibade tegelikke pindu  $\Sigma f$  (m<sup>2</sup>), võimeid  $E_n$  (mkg/sek.) ja tiirude arvusi  $n$  min. (tab. 16).

Tabel 16.

Tiiviku nr.	2	3	4	5	6	7	8	Mootori võimsus $E_n = m$ kg/sek. $D = 5,0$ m $F = 19,6$ m <sup>2</sup>			
								nr. 2	3. 4. 6. 7. 8.	nr. 5	
Tiibade $\Sigma f$ pind m <sup>2</sup>	32	12,3	6,46	4,51	4,12	3,14	1,96				
Tiiviku tiirude arv $n$ /min.  Tuule kiirus $v$ m/sek.	2	8,6	9,2	14,5				1,76	3,43		
	3	13,0	13,7	21,4	40,0	37,8		6,0	11,6	14,9	
	4	17	18,3	29,0	53,5	50,5	88,6	69,0	14,1	27,4	36,0
	6	26	27,4	43,6	76,5	75,6	133	103	47,5	92,6	119
	8	34	36,7	58,0	107	101	177	138	113	220	283
	10				134	126	222	172		428	550
	12				160	151	266	206			950
	14						310	241			

Tab. 16 nähtub, et kiirusemoodulist sõltuv erinevus määrab igapähele oma kindla aluse kasutamiseks, mille teljeks on keskmine tuulekiirus, märgitud ————— joonega. Algpöördmomentide erinevusest sõltuvalt osutub seega otstarbekaks kasutada mootorit nr. 2 (rootorit) piirkondades, kus aasta keskmine tuulekiirus  $v_k = > 2$  m/sek., nr. 3 ja 4 —  $v_k = \sim 4$  m/sek., nr. 5 ja 6 —  $v_k = \sim 6$  m/sek. ja nr. 7 ja 8 —  $v_k = 7-8$  m/sek.

### b. Tuule-energia otstarbekohane kasutamine.

Tuule-energia otstarbekohaseks kasutamiseks on vaja kindlaks määrata piirkonna tuulele sobiv tuulemootor, millest tuleb järeldada, et iga katvusastet sümboliseeriva pinnaga mootori tüüp (joon. 108) ja tiibratta läbimõõt on sõltuv piirkonna tuultest.

Kujukaks näiteks kasutame 1933. a. andmeid ja arvutame neljale piirkonnale, neis piirkondades aasta keskmiste tuulekiiruste alusel 1-hobujõulise tuulemootori tiiviku läbimõõdud, kusjuures valime mootorid ühise võimsuse kasuteguriga  $\eta = 0,35$  (tab. nr. 17)

Tabel 17.

Linn	$v_k$ (m/sek)	D (m)
Tartu	3,57	9,7
Tallinn	5,7	4,8
Pärnu	3,6	9,7
Narva-Jõesuu	5,3	5,4
Keskmine	4,9	6,0

Tabel 18

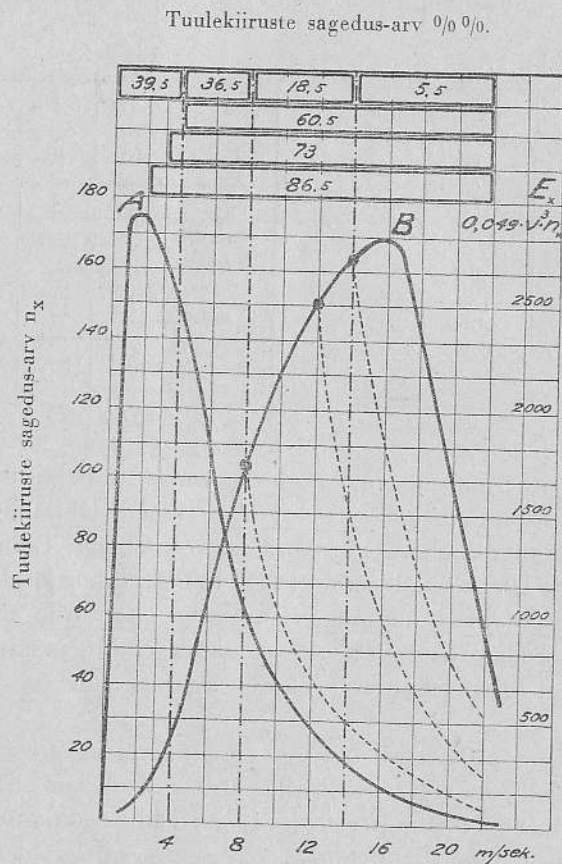
Tiibratta	nr.	3	4	5	6	7	8
	$U_{maks}$		16	42			82
$V_k$		4	6			7-8	
$V_{min}$		2	3			4	
$V_{maks}$		8	12			14	
$E_x$		35%	64%			82%	
$\eta_x$		86,5%	73%			60,5	

Neist andmeist nähtub, et aasta keskmise tuulekiiruse alusel määratud võrdse võimsusega mootorite tiiviku läbimõõdud on sõltuvalt piirkonna tuultest väga erinevad (näiteks: Tallinnale ja Tartule tiiviku läbimõõtude suhe 1:2), millest tuleb järeldada, et tiiviku läbimõõt tuleb nõutava võimsusega mootorile määratud piirkonnas puhuvate tuulte kiiruste kohaselt eraldi määrata, sest vastasel korral võiks mootor osutada asjatult suureks või liiga nõrgaks.

Igal juhul on soovitatav tiibratta läbimõõdu arvutusel kui ka tüübi valikul aluseks võtta mootorile määratud piirkonna keskmist tuulekiirust, kusjuures tuleb vältida tab. 15 ja 16 andmeil määratud  $v_k$  piiride (tab. 18) ületamist, sest sagedamini esinevad nõrgemad tuuled võiksid sel juhul suuremal määral kasutamist leida,

mida soodustab aeglasemalt jooksva tiiviku suurem algpöörmoment.

Tiiviku tüübi (joon. 108) valiku näiteks seame kolme gruppi jaotatud tiivikud (tab. 18), milledest nr. 3 ja 4 jooksevad aeglaselt, nr. 5 ja 6 keskmise kiirusega ja nr. 7 ja 8 kiiresti, võrdsesse olukorda, s. o. piirkonda, kus kõigile keskmine tuulekiirus  $v_k = 4,9$  m/sek. (tab. 17) ja kasutades joon. 13 diagramme, koostame neljale piirkonnale ühise tuulekiiruste sageduse diagrammi A (joon. 111).



Seejärgi kiiruste sagedusi rühmitades tab. 18 andmete aluse  $v_{min}$  saaksime mootorit tööle rakendavaid tuulte sagedusi aeglaselt jooksvaile tiivikuile 86,5%, keskmise kiirusega tiivikuile 73% ja kiiresti jooksvatele 60,5% aasta kestel.

Uhtlasi võtame vaatlusele aasta kestel kasutada oleva tuule-energia, arvutame kiirused energiaks valemiga

$$E_x = 0,049 \cdot v_k^3 \cdot n_x \quad (\text{v. 77})$$

ja koostame energiahulgale diagrammi B, märgitud joon. 111 joonega - - - -. Siis selle pindala kohaselt aeglaselt jooksvad mootorid rakendavad 35% keskmise kiirusega 64% ja kiiresti jooksvad 82% aastast tuule-energiast. Neid arve paigutades tab. 18 alumisse lahtrisse, tähistades %/0 aasta kestel kasutada olevaid tuulte sagedusi  $n_x$  ja tuule-energiat  $E_x$ , ja võrreldes neid arve, tuleb järeldada, et võrdses olukorras aeglaselt jooksvad tiivikud kasutavad aasta jooksul kiiremini tiirlevaist mootoreist väiksema hulga tuule-energiast, kuid seevastu nende tegevuses olemise aeg on pikem, s. o. nad on sagedamini tegevuses, mis on oluline neis piirkondades, kus sagedamini esinevad nõrgemad tuuled ja tuulevaiksed päevad (näiteks tab. 3).

Näiteks määrasime tab. nr. 17 tähendatud neljale piirkonnale ühise aasta keskmise tuulekiiruse  $v_k = 4,9$  m/sek. alusel tiiviku läbimõõdu  $D = 6,0$  m ja siinkohal valides tiiviku tüübi nr. 7 või 8, sobiks see mootor Tallinna või Narva-Jõesu, kuid mitte Tartu ega Pärnu, kus ta osutuks liiga nõrgaks ning ei suudaks kuigi sageli ega pidevalt tegevuses olla, eriti juhul, kui mootoril puudub võimalus koormata tegevust alustada. Seega neljale piirkonnale ühistel alustel määratud tuulemootor ei ole suuteline üksikus kitsamas piirkonnas nõudeid rahuldama.

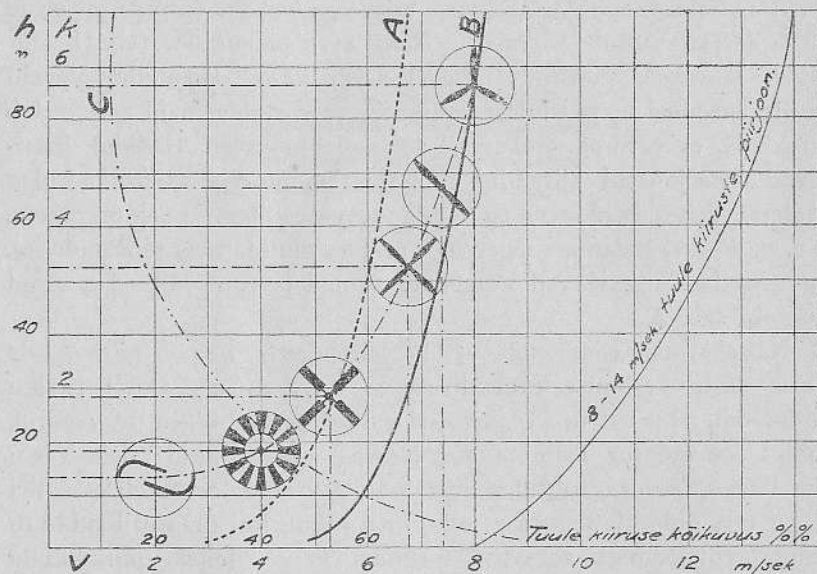
Toodud näitest tuleb ka järeldada, et väga oluline on tiiviku läbimõõdu määramisel ja tüübi valikul piirkonna keskmine tuulekiirus, mis tuleb, eriti juhul, kui tootmistehnilistel kaalutlustel soovitakse kasutada suurema kiirusemooduliga tiivikutüüpi, määrata võimalikult väikese piirkonna andmeil.

Seega tuule-energia otstarbekaks rakendamiseks võivad tulla kasutamisele kõik joon. 108 esinevad tiivikutüübid tingimusel, kui



neid kasutatakse neile sobivas õhukihis, kus keskmine tuulekiirus vastab tiivikutüübi tegevuse nõuetele. Need õhukihid võivad leida piirkondades (olenevalt maapinna reljeefist või teistest 2. osas lõige b ja c kirjeldatud põhjustest) maapinna läheduses või kõrgemais õhukihtides.

Näiteks valime piirkonna, kus maapinna läheduses õhukihi aasta keskmine tuulekiirus  $v_k = 5$  m/sek. ja käsitades tab. 4 ja joon. 15 andmeid tuulekiiruste kohta kõrgemais õhukihtides koostame diagrammi B (joon. 112).



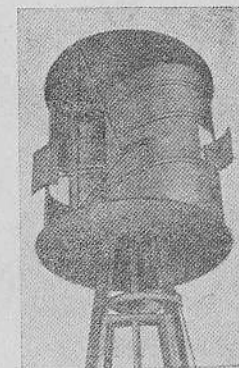
Joon. 112.

Valime tiivikutübile nr. 7 (moodul  $k = 5,8$ ) sobiva kõrguse  $h = 86$  m, kus sellele tüübile nõutav keskmine tuulekiirus  $v_k = 7-8$  m/sek. (vt. tab. 18) ja tuulekiiruste kõikumuse sagedus  $\% / \%$  (diagramm C) on minimaalne.

Paigutades teised tüübid tab. 18 andmeil alumistesse kihtidesse, on võimalik iga tiivikutüüpi tuule-energia rakendamiseks otstarbekalt kasutada.

Tabel 19.

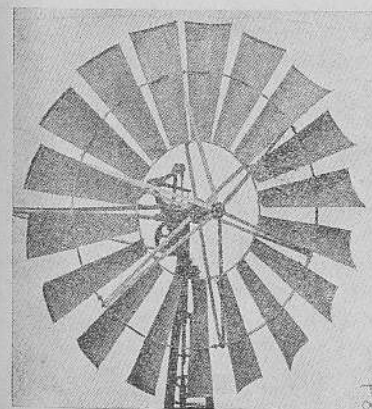
Nr.	2	3	4	5-6	8	7
h	13	19	29	52	61	86
k	0,9	1,2	1,9	3,5	4,5	5,8
$v_k$	2	4	5,3	6,8	7,4	8
Kõikumus $\% / \%$	68	55	46	22	14	12



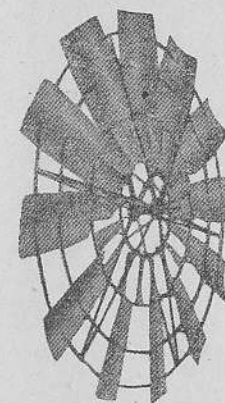
Joon. 113.  $k = 0,9$

Joon. 112 andmeil koostame tab. 19, mis võiks käsitlemist leida tiivikutüübi määramisel keskmise tuulekiiruse alusel, kusjuures ei ole oluline kõrgus  $h$  (m), vaid tiivikule määratava piirkonna keskmine tuulekiirus  $v_k$ .

Põgusaks ülevaateks tuntumate tuulemotorite tiivikuist, alates rootorist kuni kiiresti jooksva propellertüübini, toome ülesvõtted, järjestatud joonistel 113 kuni 117 kiirusemooduli kohaselt.

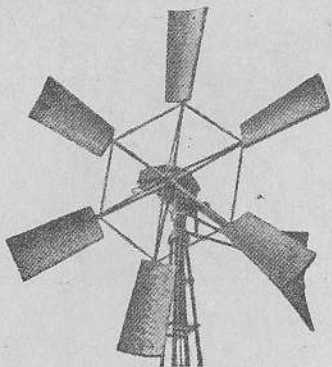


Joon. 114.  $k = 1,2 - 1,9$

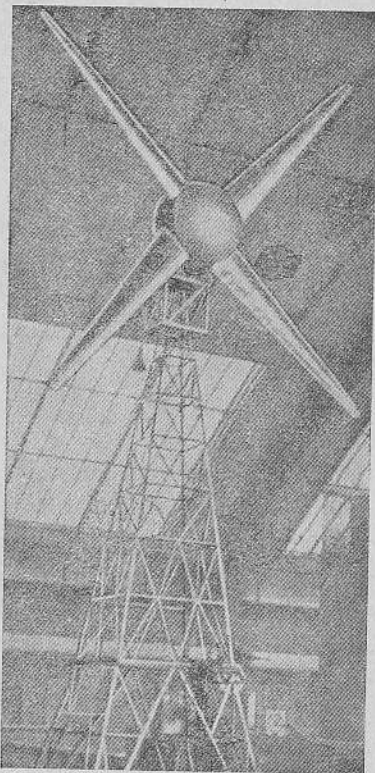


$k = 1,2 - 1,9$

Joon. 115.



Joon. 116.  
k = 2,5—3,5



Joon. 117. k = 4—6

## Kirjandust.

- Kurrik, W. „Meteoroloogia ehk ilmateduse õpetus“.
- Kägi, E. „Meteoroloogia ja okeanograafia“.
- Kirde, K. „Meteorological Elements Characterized by Frequency-Curves“. 1936.
- Kirde, K. „Andmed Eesti kliimast“.
- Kärsna, A. „Tuuleenergia jaotus Eestis“.
- Ivand, J. „Aeromehaanika“ I.
- Villems, C. „Tarvitamata tööjõud meie põllumajanduses“. E. T. S. — Ajakiri 1920. a. nr. 6.
- Tamm, P. „Tuulerootor – käepäraseim jõumasin“. T. K. 1938. a. nr. 1 „Tuuleturbiinid“. O/U. „Waba Maa“ kirjast. 1936. a.
- Prümmel, J. „Tuulejõu abil majja...“ „Waba Maa“ kirjast. 1933. a. Молчанов, „Аэрология“.
- Фатеев, А. М. „Ветродвиатели“.
- Красовский, Н. В. „Как использовать энергию ветра“.
- Гоннеф-Келлер „Ветро-Электрические станции.“
- Сабинин, Г. X. „Проблема использования энергии ветра“.
- Betz, A. „Wind-Energie“.
- Betz, A. „Die Vorgänge beim Schraubenpropeller“. Die Naturwissenschaften. 1921. Heft 18.
- Betz, A. „Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust“. Nachrichten von der K. G. der W. zu Göttingen 1919 Heft 2.
- Stertz, O. „Moderne Windturbinen“.
- Stertz, O. „Windkraft oder Kleinmotoren“.
- Hammel, L. „Die Ausnutzung der Windkräfte“.
- Honnef, H. „Windkraftwerke“.
- Bilau, K. „Windmühlenbau einst und jetzt“.
- „Die Windkraft in Theorie und Praxis“.
- Borck, H. „Die Luftschraube“.
- Savonius, S. J. „The wing-rotor in Theory and practice“.
- Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen Lieferung III u. IV.
- Riefstahl, L. „Wirtelektrische Anlagen und die Gesichtspunkte für ihren Entwurf“. AEC-Mitteilungen. 1925 S. 334.
- Hullen, H. „Die wirtschaftliche Ausnutzung der Windenergie“ VDI 1925 S. 132.
- Ackert, J. „Neue Versuche an Windmühlenmodellen“ VDI 1925 S. 1172.
- Pfleiderer, C. „Anwendung der elementaren Turbinentheorie auf die Berechnung der Windräder“ VDI 1921 S. 1003.



- Kauffel, A. „Das Rotor-Motorschiff „Barbara“. VDI 1927 S. 119.  
 „Neues über Windkraftanlagen“ Arch. f. Wärm. u. Dampf. 1934  
 S. 159.  
 Conrad, W. „Zur Berechnung von Windmühlenflügeln“ VDI 1937  
 S. 521.  
 Caille, C. „Untersuchungen am Modell eines Windkraftwerkes“  
 Arch. f. Wärm. und Dampf. 1940 S. 9.  
 Witte, H. „Windkraftanlagen in der Sowjetunion“ ETZ 1942 S. 220

---

## Sisukord.

1. Tuul energiaallikana . . . . .	lk. 7
2. Tuul kui õhuliikumine.	
a. Õhu raskus . . . . .	8
b. Õhu liikumise kiirus . . . . .	8
c. Tuulekiiruse sõltuvus kõrgusest . . . . .	15
d. Tuule suund . . . . .	21
3. Tuule-energia.	
a. Tuule surve paigalseisvale pinnale . . . . .	23
b. Tuule surve liikuvale pinnale . . . . .	25
c. Pinnast läbivoolava õhu liikumisenergia . . . . .	26
4. Tuulemootori tiivik.	
a. Tiiva kuju . . . . .	32
b. Vertikaalteljega tiivik . . . . .	38
c. Horisontaalteljega tiivik . . . . .	39
5. Tuulemootorite tüübid ja tornid.	
a. Vertikaalteljega tuulemootorid . . . . .	51
b. Horisontaalteljega tuulemootorid . . . . .	57
c. Tornid . . . . .	83
6. Tuule energia rakendamisest.	
a. Otstarbeka tuulemootori tüübi valimine . . . . .	92
b. Tuule-energia otstarbekohane kasutamine . . . . .	99
7. Kirjandust . . . . .	105

---