

# ВВЕДЕНИЕ В ВЕТЕР

Ветряные двигатели в свете  
современных исследований

# Ветер



Дюны в пустыне Нью-Мексико и выветренные скалы Toadstool Geologic Park in the Oglala National Grassland of northwestern Nebraska.

# Ветер





# Ветер



**Киндердейк** (нидерл. *Kinderdijk*) — деревня в Нидерландах в провинции Южная Голландия, около 15 км к востоку от Роттердама. Примерно в 1740 году для осушения полей была построена система из 19-ти ветряных мельниц.

# Ветер

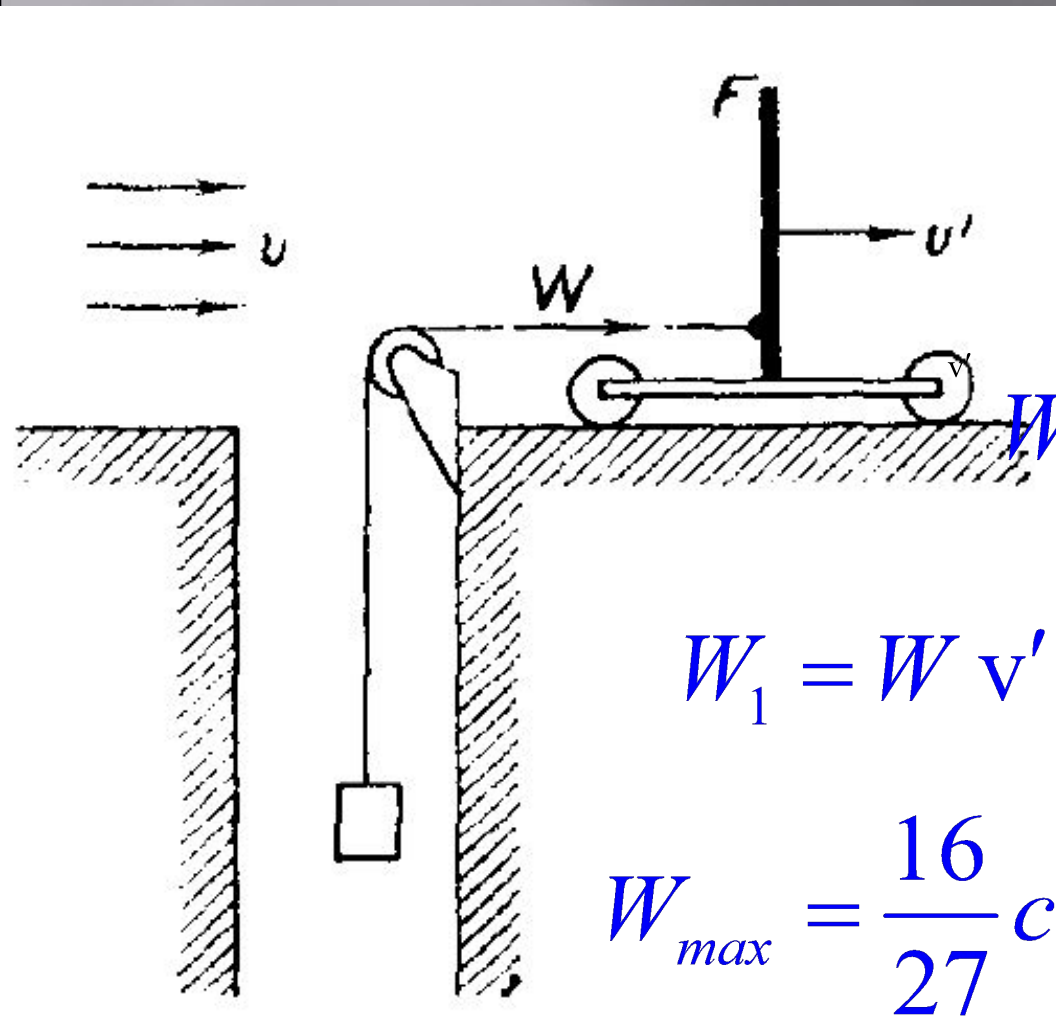




# Ветер



# Простейший механизм



$$W_0 = \frac{d}{dt} \frac{m v^2}{2} = \frac{\rho S v^3}{2}$$

$$W_1 = W v' = c_w \frac{\rho}{2} S (v - v')^2 \cdot v'$$

$$W_{max} = \frac{16}{27} c_w \frac{\rho}{2} S v^3 = \frac{16}{27} c_w \cdot W_0$$

# Мощность ветроколеса

$$m = \rho S v'; \quad W_{\text{ВЭУ}} = \frac{m}{2} (v^2 - v_{\text{кон}}^2);$$

Расход мощности ветром:

$$W_{\text{расх}} = F_{\text{сопр}} v', \quad F_{\text{сопр}} = m (v - v_{\text{кон}}).$$

$$\frac{m}{2} (v^2 - v_{\text{кон}}^2) = F_{\text{сопр}} v' \rightarrow v' = \frac{v + v_{\text{кон}}}{2}$$

$$W_{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \rho S \frac{v + v_{\text{кон}}}{2} (v^2 - v_{\text{кон}}^2) = \frac{\rho S}{4} v^3 \times$$

$$\times \left( 1 + \frac{v_{\text{кон}}}{v} \right) \left( 1 - \left( \frac{v_{\text{кон}}}{v} \right)^2 \right) \rightarrow \frac{v_{\text{кон}}}{v} = \frac{1}{3}$$



# Мощность ветроколеса

$$(W_{\text{ВЭУ}})_{\text{max}} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho S v^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot W_0 = 0,5925 \cdot W_0$$

Критерий А. Бетца.

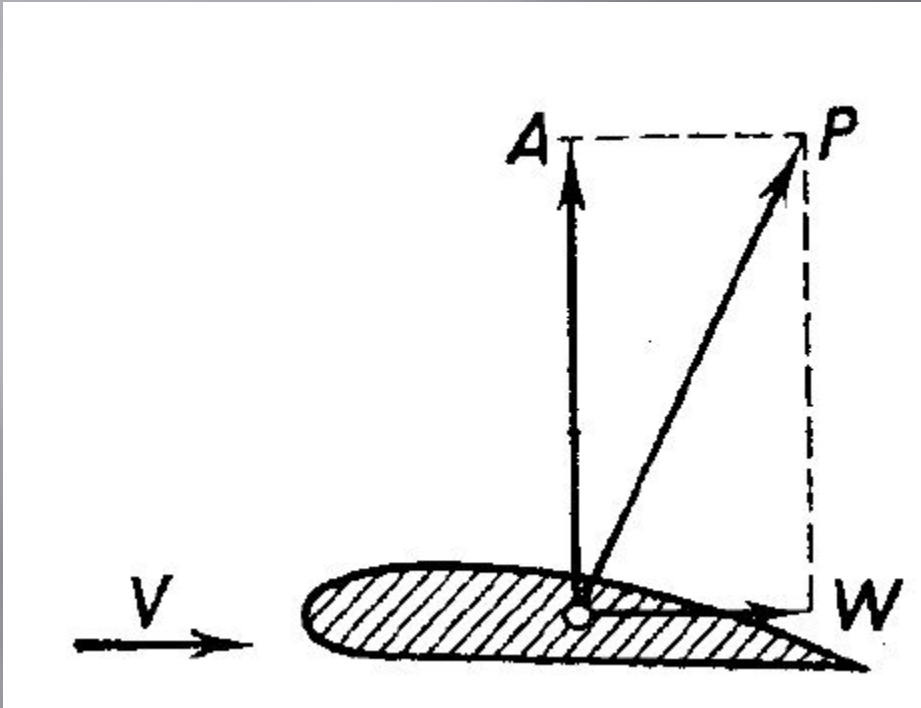
Naturwissenschaften, 18, Nov., 1927;

Бетц А. Ветровые двигатели в свете современных исследований. УФН, 1930, Т. 10, Вып. 2, С. 165-190.

(перевод В. Шулейкина)

# Крыло

Обратное качество крыла



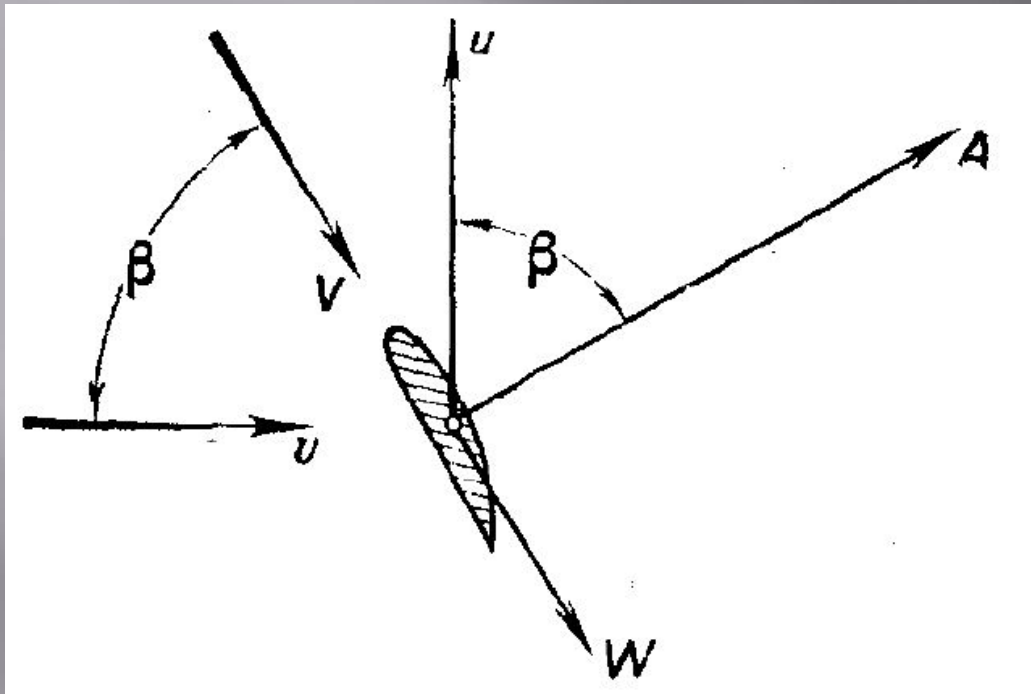
$$\varepsilon = \frac{W}{A}$$

$$A = C_A \frac{\rho}{2} S_K v^2$$

$$W = C_W \frac{\rho}{2} S_K v^2$$

$S_K$  — наибольшая площадь проекции крыла

# Движущееся крыло



Полезная работа  
совершается силой  $A$

$$T_1 = A \cos \beta$$

Сила сопротивления  
движению

$$T_2 = W \sin \beta$$



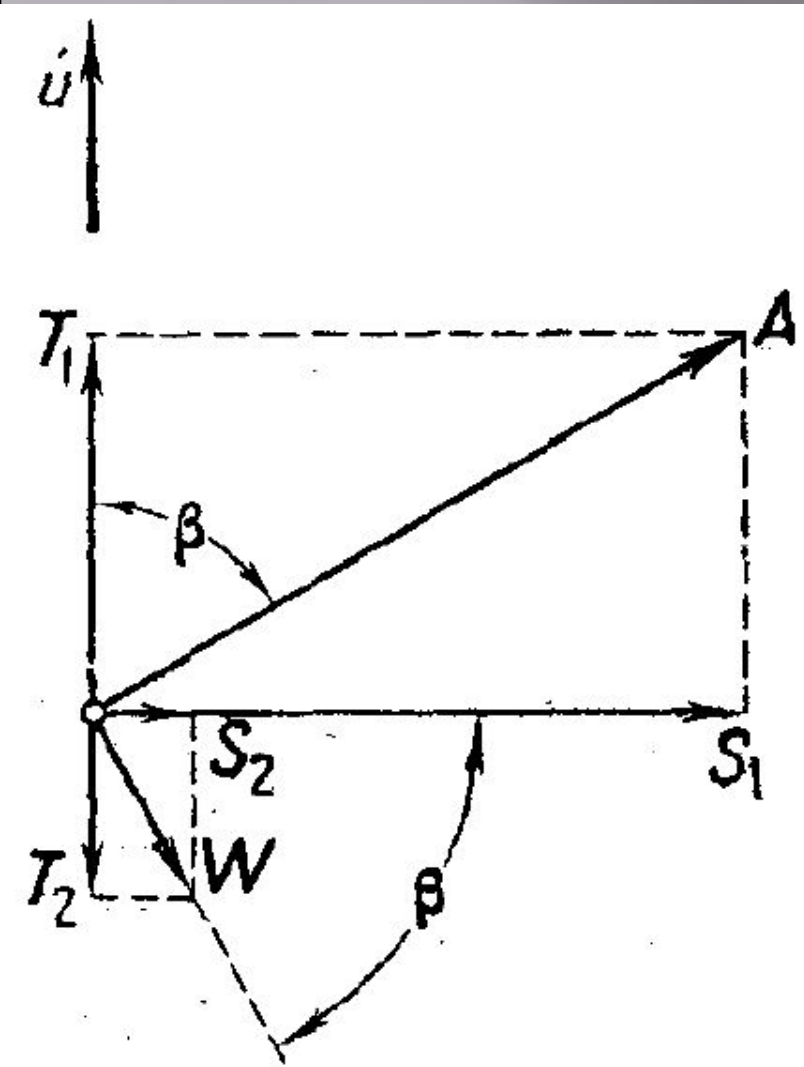
# Движущееся крыло

Суммарная сила, совершающая полезную работу

$$\begin{aligned} T &= T_1 - T_2 = \\ &= A \cos \beta - W \sin \beta = \\ &= A \cos \beta (1 - \varepsilon \operatorname{tg} \beta) \end{aligned}$$

Полезная работа

$$\begin{aligned} L_N &= Tu = Au \cos \beta \times \\ &\times (1 - \varepsilon \operatorname{tg} \beta) \end{aligned}$$



# КПД крыла

Усилие сдвига, действующее на крыло

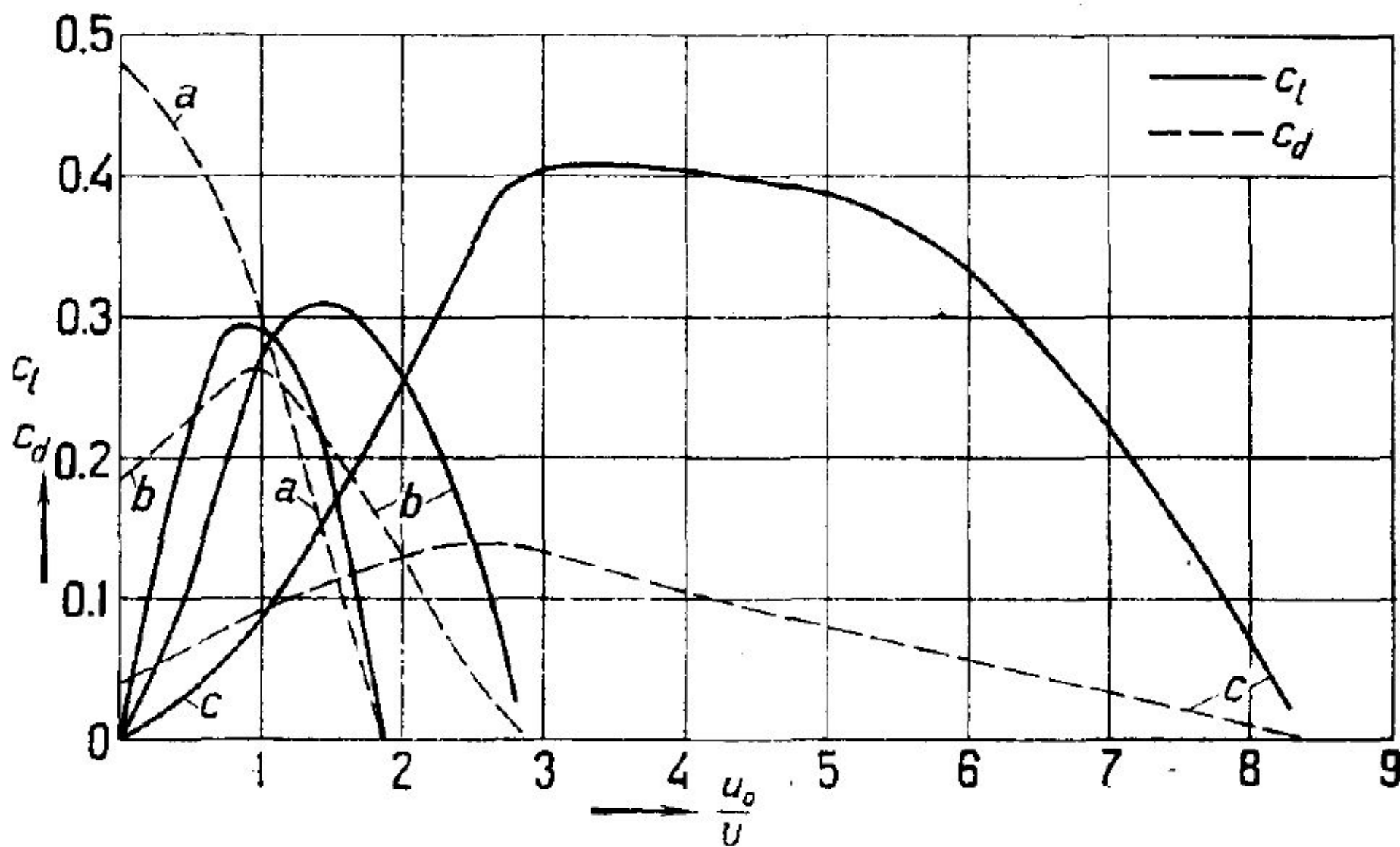
$$S = S_1 + S_2 = A \sin \beta + W \cos \beta = \\ = A \sin \beta (1 + \varepsilon \operatorname{ctg} \beta)$$

Энергия ветра

$$L_W = Sv = Av \cdot \sin \beta (1 + \varepsilon \operatorname{ctg} \beta)$$

КПД крыла

$$v \sin \beta = u \cos \beta; \quad L_N = L_W \cdot \frac{1 - \varepsilon \operatorname{tg} \beta}{1 + \varepsilon \operatorname{ctg} \beta} = L_W \cdot \frac{1 - \varepsilon \frac{u}{v}}{1 + \varepsilon \frac{v}{u}}$$



- a) тихоходная
- b) промежуточная
- c) быстроходная

$$C_l = \frac{W_{\text{ВЭУ}}}{W_0}; \quad C_d = C_l \frac{v}{u_0}$$