

ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ВОДОПОДЪЕМНЫЕ УСТАНОВКИ
С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ, ИХ АЭРОДИНАМИ-
ЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Проф., д. т. н. Яковлев А. И., с. н. с., к. т. н. Мосина И. И.,
аспирант Чертков А. А.

Для обеспечения возможности наращивания единичной мощности ветрогенераторов и создания станций различного уровня мощности путем агрегатирования нескольких модулей в единый агрегат наиболее приемлемы для условия розы ветров Украины ветротурбины (ВТ) с вертикальной осью вращения. Они сравнительно просты в изготовлении и надежны в эксплуатации.

Общим для таких ветротурбин является система из 2-х или 3-х рабочих лопастей с симметричным (рис. 1, вар. I) и крыловидным несимметричным профилями (рис. 1, вар. II), которые закреплены на пилонях (рис. 2) или непосредственно на валу (рис. 3).

Принцип работы понятен при рассмотрении треугольников скоростей и аэродинамических сил, изображенных на рис. 1, а, б, в.

Рассмотрим ветротурбину осевого типа (рис. 1, вар. I; рис. 3), лопасти которой движутся по окружности вокруг вертикальной оси, расположенной перпендикулярно направлению ветрового потока. При этом они работают в условиях нестационарных режимов обтекания, вызванных непрерывным изменением углов атаки и прохождением на тыловом участке траектории области вихревого следа.

Для определения аэродинамических характеристик ветродвигателей рассматриваемого типа предлагается использовать метод дискретных вихрей в рамках идеальной среды [1-3].

Для определения аэродинамических характеристик профиля достаточно найти потенциал возмущенных скоростей, удовлетворяющий следующим условиям:

I) волновому уравнению

$$(1-M^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{2M}{a_\infty} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} - \frac{1}{a_\infty^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0,$$

2) граничным условиям на бесконечности

3) условию о непротекании крыла

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \eta} = -\alpha(\tau) - \omega_x(\tau) \xi_0 - \omega_z(\tau) \xi_0 + \frac{\partial f \delta}{\partial \xi_0} \delta(\tau) + f \delta(\xi_0, \xi_0) \delta(\tau) - f_\Delta(\xi_0, \xi_0) \Delta \tau = 0$$

4) условию на вихревой пелене

$$\varphi(x, 0, z, t) = \varphi(x^*, 0, z, t^*)$$

$$t^* = t - \frac{x^* - x}{U_0}$$

5) должна выполняться гипотеза Чаплыгина-Луковского о конечности окрестности на задних острых кромках крыла в рамках теории идеального газа при дозвуковых течениях.

При решении задач в несжимаемой среде при дозвуковых скоростях набегающего потока наиболее целесообразно не искать непосредственно потенциал возмущенных скоростей, а заменить профиль и след за ним вихревой поверхностью и находить напряженность циркуляции в ее отдельных характерных точках. В этом случае не нужно переходить к потенциалу возмущенных скоростей, так как аэродинамические характеристики профиля определяются по теореме Луковского непосредственно через найденное распределение напряженности циркуляции вихревого слоя на профиле. В связи с этим получил развитие и применение метод дискретных вихрей. Профиль и след за ним заменяется вихревой поверхностью, распределение циркуляции которой является функцией координат и времени, для которых удовлетворяется волновое уравнение и условие на бесконечности.

Для нахождения распределения напряженности циркуляции вихревой поверхности непрерывное изменение циркуляции по координате вдоль профиля приближенно заменяется ступенчатым, а вихревой слой принимается состоящим из дискретных присоединенных вихрей и отходящей от них пелены свободных дискретных вихрей. Напряженность пелены свободных вихрей представляется через циркуляцию присоединенных

вихрей в каждый момент времени с учетом условия на вихревой пелене за профилем.

Для определения циркуляции присоединенных вихрей используется условие непроницаемости крыла в контрольных точках, число которых выбирается равным числу присоединенных вихрей, а расположение их на профиле выбирается таким образом, чтобы выполнялась гипотеза Чаплыгина-Жуковского. Это условие автоматически выполняется, если последние контрольные точки взяты между задней кромкой и последним дискретным присоединенным вихрем этого сечения.

Суммы, которыми заменяют несобственные интегралы при переходе от непрерывного вихревого слоя к дискретным вихрям должны соответствовать их главным значениям в смысле Коши. Это условие выполняется, если контрольные точки лежат посередине между соседними присоединенными вихрями и отстоят на равном расстоянии от свободных вихревых шнуров, отходящих от их концов, при этом принимаем законы движения профиля известным, т.е. нормальные составляющие скорости на поверхности крыла заданы. Нормальная составляющая возмущенной скорости W_n , возникающая при движении несущей поверхности должна компенсировать их в любой момент времени (условие плавного обтекания).

Непрерывный процесс изменения граничного условия и циркуляции во времени заменяется ступенчатым. В определенные моменты времени происходит скачкообразное изменение граничных условий и циркуляций, а в промежутках между ними циркуляции не меняются. Соответственно этому свободные вихри сходят в дискретные моменты времени.

Представим ветроколесо рассматриваемого типа состоящим из нескольких размещенных по окружности лопастей бесконечного размаха, имеющих тонкий профиль. В этом случае обтекание каждой лопасти равносильно обтеканию профиля, вращающегося с угловой скоростью вокруг начала неподвижной системы координат. Обтекание профиля в первом

приближении будем считать плавным без срывов.

Движение ветроколеса обусловлено наличием крутящего момента, возникающего при воздействии потока ветра на лопасть ветроколеса (см. рис. I). При этом возникает нормальная сила F_{nj} , действующая на лопасть вследствие наличия перепада давлений перед и после лопасти. F_{nj} разлагается на тянущую силу F'_{Qj} , направленную по касательной и создающую крутящий момент, и радиальную F''_{Rj} , которая такого момента не создает. При этом следует учитывать и тангенциальную силу F'_{Tj} , направленную вдоль хорды лопасти, составляющая которой F''_{Qj} , создает момент, препятствующий движению ветроколеса.

На рис. I обозначено:

W - относительная скорость движения лопасти;

W_{τ} - касательная составляющая относительной скорости, направленная вдоль хорды лопасти;

F_{nj}^* - нормальная сила, развиваемая элементом лопасти длиной без учета концевых эффектов в идеальной среде;

F'_{Rj}, F''_{Rj} - составляющие радиальной аэродинамической сил от нормальной и тангенциальной;

F'_{Qj}, F''_{Qj} - составляющие тянущей аэродинамической силы.

Вдоль хорды каждого профиля размещаются суммарные дискретные вихри (присоединенные и свободные), а перед передней и за задней кромками профиля - свободные дискретные вихри. Интенсивности свободных вихрей в следе в любой момент времени сохраняются неизменными, а их положение определяется из условия, что они движутся с частицами среды.

Примем обозначения:

R - радиус ветроколеса; V - скорость невозмущенного потока; b - хорда профиля лопасти и отрезок, соединяющий концы профиля; ω - частота вращения ветроколеса; z - число лопастей; φ - угол установки лопасти; β - азимутальный угол, определяющий по-

положение лопасти в данный момент; L - длина лопасти (высота ветроколеса).

На данном этапе расчета геометрию профиля лопасти полагаем заданной. Она задается точками деления срединной линии профиля лопасти, т.е. радиусом, проведенным в точку из начала координат Rch_k и углом, образованным этим радиусом с осью $Oz - fch_k$. Эти данные определяются для одного профиля. Для остальных профилей радиусы остаются неизменными, а углы точек разбиения определяются с учетом положения профиля, т.е.

$$fch_{ik} = fch_k + (i-1)faz, \quad (I)$$

где K - порядковый номер точки разбиения, нумерация начинается с передней кромки профиля лопасти;

i - количество лопастей.

$$faz = \frac{2\pi}{i}$$

Безразмерные координаты точек разбиения срединных линий профиля лопастей определяются следующим образом

$$zch_{tk} = Rch_k \cdot \cos(fch_{tk})/R$$

$$xch_{tk} = Rch_k \cdot \sin(fch_{tk})/R$$

Срединная линия профиля моделируется ломанной линией, соединяющей точки разбиения (рис.4). Каждый отрезок прямой, соединяющий точки разбиения, разделен на 4 части. Примем, что начало отрезка находится ближе к передней кромке, если обходить последовательно все точки разбиения.

Обозначим длину каждого отрезка B_k . В точку, находящуюся на расстоянии $B_k/4$ от начала k -того отрезка, поместим дискретный присоединенный вихрь и присвоим ему номер $\mu = K$

Введем соответствующую безразмерную величину интенсивности вихревого слоя

$$j_{\mu,j}^M = V B \Gamma_{\mu,j}^M,$$

где $\Gamma_{\mu, j}^M$ - циркуляция μ -того суммарного вихря на j -том профиле в момент времени $\tau_M = (M-1)\Delta\tau$; $M = 1, 2, 3$ - порядковый номер отсчета.

Координаты присоединенных вихрей определяются по зависимостям

$$\begin{aligned} X_{\mu j} &= (3X_{ch \mu j} + X_{ch \mu, j+1})/4; \\ Z_{\mu j} &= (3Z_{ch \mu j} + Z_{ch \mu, j+1})/4, \end{aligned}$$

где μ - номер вихря; j - номер профиля.

Координаты контрольных точек определяются аналогично

$$\begin{aligned} X_{\nu j} &= (X_{ch \nu, j} + 3X_{ch \nu, j+1})/4 \\ Z_{\nu j} &= (Z_{ch \nu, j} + 3Z_{ch \nu, j+1})/4 \end{aligned}$$

Здесь ν - номер контрольной точки, j - номер профиля.

Система уравнений, определяющая интенсивность суммарных вихрей на профилях в расчетный момент времени τ_M может быть записана в

$$\begin{aligned} \text{виде } \sum_{j=1}^L \sum_{\mu=1}^{n+2} j_{\mu, j}^M a_{\mu, j}^{\nu, j'} &= 2\pi f_{\nu, j'}^M - \sum_{j=1}^L \sum_{L=1}^{M-1} (\delta_{1j}^L a_{L, j}^{\nu, j'} + \delta_{3j}^L a_{L, j}^{\nu, j'}) \\ \sum_{\mu=1}^{n+2} j_{\mu, j'}^M &= - \sum_{L=1}^{M+1} (\delta_{1j'}^L + \delta_{3j'}^L) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\nu = 1, \dots, n+1; \quad j' = 1, \dots, l; \quad j = 1, \dots, l$$

Следует отметить, что под $(n+1)$ вихрем подразумевается свободный вихрь, ближайший к n -ому присоединенному вихрю и находящемуся на продолжении n -ого участка на расстоянии от n -ой контрольной точки, равной ее расстоянию от n -го присоединенного вихря. Тогда координаты этого вихря, принадлежащие j -тому профилю, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_{j, n+1} &= 2X_{\nu, j} - X_{\mu, j} \\ Z_{j, n+1} &= 2Z_{\nu, j} - Z_{\mu, j} \end{aligned} \right\},$$

где $\nu = \mu - n$

Под $(n+2)$ -ым вихрем - свободный вихрь, ближайший к первому присоединенному вихрю и отстоящий на таком же расстоянии от первой

контрольной точки, располагающейся на передней кромке.

Порядок системы (I) равен $(n + 2)$. Через δ_{ij}^L обозначена безразмерная интенсивность свободного вихря, сошедшего с задней кромки j -того профиля в момент времени $\tau_{L,M}$, а через ϵ_{3j}^L с передней кромки.

Безразмерная функция $f_{v,j}$ определяется из условия непротекания в контрольной точке $(x_{v,j}; z_{v,j})$.

Для рассматриваемого случая

$$f_{v,j}^M = \sin(\beta_{v,j}^d + \varphi_{v,j}^d) + \bar{U} \bar{B} [z_{v,j}^d \sin(\beta_{v,j}^d + \varphi_{v,j}^d) - x_{v,j}^d \cos(\beta_{v,j}^d + \varphi_{v,j}^d)]$$

Здесь $\bar{U} = \frac{\omega R}{V}$ - число модулей (относительная скорость движения)
 $\bar{B} = b/R$; $\beta_{v,j}^d$ - азимутальный угол v -того звена ломанной; $\varphi_{v,j}^d$ - угол установки v -того звена ломанной, т.е. угол, составляемый звеном ломанной и перпендикулярной к радиусу, проведенному к середине v -того звена ломанной.

На данной стадии расчета $\varphi_{v,j}^d$ задается в исходных данных, а $\beta_{v,j}^d$ определяется следующим образом

$$\beta_{v,j}^d = \arctg((x_{ch v,j} + x_{ch v+1,j}) / (z_{ch v,j} + z_{ch v+1,j}))$$

Коэффициенты в левой части уравнений (2) от времени не зависят и равны

$$a_{\mu,j}^{v,j'} = V_z \cos(n_{v,j'}^{j',z}) + V_x \cos(n_{v,j'}^{j',x}) \quad (3)$$

Косинусы внешней нормали с осями координат определяются для каждого v -того отрезка ломанной; V_z, V_x - безразмерные компоненты скорости, индуцируемой вихрем с координатами (x_{μ}^d, z_{μ}^d) в контрольной точке с координатами $(x_{v,j'}^{d'}, z_{v,j'}^{d'})$.

Отметим, что j не обязательно равно j' , т.е. рассматривается влияние всех присоединенных вихрей всех профилей на данную (v) контрольную точку j' -того профиля.

найдем зависимости, по которым определяются V_z, V_x и

$$\cos(n_{v,j'}^{j',z}), \quad \cos(n_{v,j'}^{j',x})$$

Длина отрезка, соединяющего (ν, j') контрольную точку с (μ, j) вихрем

$$dr = \sqrt{(x_{\nu, j'} - x_{\mu, j})^2 + (z_{\nu, j'} - z_{\mu, j})^2}$$

Тогда

$$v_{x_{\mu, j}}^{\nu, j'} = (z_{\nu, j'} - z_{\mu, j}) / dr^2;$$

$$v_{z_{\mu, j}}^{\nu, j'} = -(x_{\nu, j'} - x_{\mu, j}) / dr^2;$$

$$\cos(\pi_{\nu, z}^j) = -(x_{ch(\nu+1), j} - x_{ch \nu, j}) / b_k;$$

$$\cos(\pi_{\nu, x}^j) = (z_{ch(\nu+1), j} - z_{ch \nu, j}) / b_k,$$

где b_k - длина отрезка ломаной.

Коэффициенты в правой части (2) зависят от времени и определяются эмпирически (3) через координаты всех свободных вихрей и контрольных точек.

Задача решается последовательно на каждом шаге времени.

На первом шаге при $M = 1$ ($\tau = 0$) значения сумм в правой части (2) равны 0. Для каждого последующего расчетного момента времени система (2) решается с учетом сумм в правой части, при этом в каждый расчетный момент времени определяются координаты свободных вихрей.

Для удобства неподвижная система лопастей, обтекаемых двумя видами течений: прямолинейным со скоростью U , изменяющим угол атаки (угол, составляемый с осью X), и вращательным, с частотой вращения - ω . Поэтому свободный вихрь, сошедший в отрезок времени M с j -того профиля, будет всегда находиться в точке с координатами $(x_{j, n+1}; z_{j, n+1})$.

Для того, чтобы в расчетный момент времени M определить коэффициенты свободного вихря, сошедшего с j -того профиля в момент времени L необходимо последовательно протраивать его путь, полагая, что в M -тый отрезок времени этот вихрь движется равномерно и прямолинейно со скоростью частицы среды, которая в данный отрезок

времени находится в этой же точке.

Таким образом, с каждым последующим расчетным шагом количество свободных вихрей увеличивается на $2i$, координаты их необходимо каждый раз пересчитывать и хранить в памяти. Скорость частицы среды определяется с учетом влияния всех присоединенных и всех свободных вихрей.

В процессе счета свободный вихрь может оказаться на бесконечно малом расстоянии от другого вихря (или на профиле, или в следе). Тогда индуцируемые этим вихрем скорости обращаются в бесконечность. Для устранения этой особенности вводится заранее заданная мера дискретности (например, половина длины наименьшего звена ломаной). Если расстояние между вихрями на каком-то шаге становится меньше данной величины, то взаимовлияние этих вихрей на данном шаге исключается из рассмотрения.

Коэффициент аэродинамической нагрузки на μ -том расчетном участке j -того профиля в момент времени τ_m определяется как

$$\Delta \bar{P}_{\mu,j}(\tau_m) = 2(j_{\mu,j}^M W_{\mu,j}^M - \Delta G_{\mu,j}^M) / \Delta \tau$$

Следует учитывать, что $\Delta \bar{P}_{\mu,j}$ направлено по внешней нормали к каждому участку профиля.

В формуле (3) $\Delta G_{\mu,j}^M$ - изменение интенсивности вихрей по замкнутому контуру, охватывающему весь вихревой след за профилем и присоединенные вихри на нем с номерами от μ до n ; $W_{\tau,\mu,j}^M$ - касательная составляющая безразмерной относительной скорости среды, направленная от носка к задней кромке профиля, а

$$W_{\tau,\mu,j}^M = V_{\tau,\mu,j}^M + U_{\tau,\mu,j}^M,$$

где $V_{\tau,\mu,j}^M$ - касательная составляющая скорости натекающего на ротор невозмущенного потока, сложенная с касательной составляющей окружной скорости вращения профиля; $U_{\tau,\mu,j}^M$ - касательная составляющая скорости индуцируемой присоединенными и свободными вихрями.

В соответствии с этим

$$W_{\tau \mu j}^1 = \omega R \text{ch} \mu / V (\cos(n_{\mu, z}^j) \cos(f \text{ch} \mu) + \cos(n_{\mu, x}^j) \times \\ \times \sin(f \text{ch} \mu)) + \sum_{m=1}^l \sum_{k=1}^{n+1} (v_{xmk}^{\mu j} \cos(n_{\mu, t}^j) + v_{zmk}^{\mu j} \cos(n_{\mu, x}^j)) j_{\mu j}^1 - \\ - \cos(n_{\mu, z}^j)$$

Тогда для $M=1$ $\Delta \bar{P}_{\mu j}^{-1} = 2 j_{\mu j}^1 \cdot W_{\tau \mu j}^1$

В рассматриваемом случае C_{nj} определяется как равнодействующая всех аэродинамических нагрузок, действующих на звенья ломаной, т.е.

$$C_{njx}^* = \sum_{\mu=1}^n \Delta P_{\mu, j} \cos(n_{\mu, x}^j);$$

$$C_{njz}^* = \sum_{\mu=1}^n \Delta P_{\mu, j} \cos(n_{\mu, z}^j);$$

$$C_{nj}^* = \sqrt{C_{njx}^{*2} + C_{njz}^{*2}} \quad - \text{коэффициент нормальной силы } j \text{-того профиля.}$$

Коэффициент равнодействующей всех нормальных сил найдем аналогично.

$$C_{nx}^* = \sum_{j=1}^l C_{njx}^*$$

$$C_{nz}^* = \sum_{j=1}^l C_{njz}^*$$

$$C_n^* = \sqrt{C_{nx}^{*2} + C_{nz}^{*2}}$$

нормальная сила, развиваемая ветроколесом, без учета концевых эффектов в идеальной среде $F_n^* = \rho \frac{U_0^2}{2} R L C_n^*$

Соответственно, безразмерный момент равен

$$m_z = \sum_{k=1}^W \sum_{ic=1}^l \alpha P_{nj}(k, ic) [Z_{nj}(k, ic) \cos \chi_{nj}(k, ic) - \chi_{nj}(k, ic) \times \\ \times \cos Z_{nj}(k, ic)] \times \text{vch} \eta(ic),$$

а момент

$$M = m_z \rho \frac{U_0^2}{2} S R,$$

где S - ометаемая площадь

Мощность, развиваемая ветроколесом $N = \omega M$. Коэффициент использования ветра $\xi = m_z \cdot \omega / U_0$

Этот метод позволяет определить лишь нормальные аэродинамические нагрузки, действующие на лопасть бесконечного размаха при ее вращении в потоке идеальной несжимаемой среды.

Для определения развиваемой ветроколесом мощности важно знать тяговую усилие каждой лопасти в направлении вращения. Это усилие в значительной степени зависит не только от подъемной силы лопасти, но и от сил сопротивления, возникающих в реальной среде.

Обозначим через $F_{nj} = \rho \frac{W^2}{2} b L C_{nj}$ - нормальную силу, развиваемую профилированной лопастью ветроколеса заданной длины L в реальной среде, причем W - относительная скорость движения лопасти.

Принимается, что $F_{nj} = \eta F_{nj}^*$, а $\eta = \frac{C_n^\alpha}{2\pi}$; здесь C_n^α - стационарная аэродинамическая производная коэффициента нормальной силы изолированной лопасти исследуемого ветроколеса при числе Re , соответствующем скорости W (определяется по результатам испытаний) $2\pi = C_n^\alpha$ для пластины бесконечного размаха в идеальной среде по углу атаки.

Тогда
$$C_{nj} = \frac{\gamma}{W^2} C_{nj}^*$$

Касательная составляющая относительной скорости определяется для точки, лежащей на расстоянии $3/4$ хорды от носка профиля.

По приведенной методике составлена программа для расчета на ПЭВМ типа IBM отрывного обтекания тонкого профиля идеальной жидкостью. Визуализация результатов производилась с использованием пакета прикладных программ "Граф".

Модулируемого дужкой окружности с хордой, заданной длины в заданной стрелой прогиба профиля f . В частности, при значении $f = 0$, дуга окружности вырождается в отрезок прямой, таким образом, по приведенной методике может быть произведен расчет и для прямого симметричного и крыловидного несимметричного (рис. 5, 6) профиля.

С использованием разработанной программы проведен численный эксперимент по определению характера обтекания единичного тонкого бесконечного профиля при различных значениях угла атаки α , стрелы прогиба профиля f и относительной координаты стрелы прогиба про-

филя X_f .

Результаты расчетов хорошо совпадают с результатами физических и численных экспериментов, описанных в [1]. Как видно из рис.6, при угле атаки $\alpha = -90^\circ$, две пелены свободных вихрей, отходящих от передней и задней кромок, симметричны и сворачиваются в сгустки.

Для ветроколеса, состоящего из трех тонких профилей (рис.1, пар.П), определена мощность, развиваемая ветроколесом в идеальной жидкости без учета концевых эффектов в начальный момент времени при различных значениях скорости набегающего потока заданной относительной скорости задней кромки профиля (рис.7).

Разработано несколько ветроагрегатов с вертикальной осью вращения для выработки электроэнергии (рис.3), для водоподъема (рис.2), варианты передвижных ветростанций (рис.8), служащих, например, в качестве автономных источников электропитания в системах электро-сторожа, электропастуха, в рыбоводческих хозяйствах для аэрации водоемов и др. [4 - 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью.
2. К.П.Вашкевич, В.В.Самсонов "Расчет аэродинамических характеристик ветроколес вертикально-осевого типа с использованием метода дискретных вихрей." Промышленная аэродинамика. М.:Машиностроение.-1988, с.159-170.
3. Яковлев А.И., Левинских О.В. Аэродинамический расчет ветротурбины с вертикальной осью вращения методом дискретных вихрей.- Аэродинамические, тепловые и виброакустические процессы в электроустановках.-Межвуз. темат. сб. науч. трудов. ХАИ, Харьков, 1989.- с.130-139.
4. А.с. 1564375 СССР, МКИ Г 03Д 3/02, Ветроагрегат/А.И.Яковлев, С.Н.Бочкарев, О.В.Левинских/Б.И. № 18, 1990.
5. А.с. 1546700 СССР, МКИ Г 03Д 3/02. Передвижная ветроэлектрическая станция/А.И.Яковлев, О.В.Левинских и др./ Б.И. № 8, 1990.
6. Заявка на патент Украины "Ветродвигатель"/А.И.Яковлев, А.А.Чертков, С.А.Кудря/; заявка ^{подана} в НДЦПЕ в октябре 1993 г.
7. Заявка на патент Украины "Водоподъемное устройство/ А.И.Яковлев, А.Б.Кошванец/; заявка подана в НДЦПЕ в ноябре 1993 г.

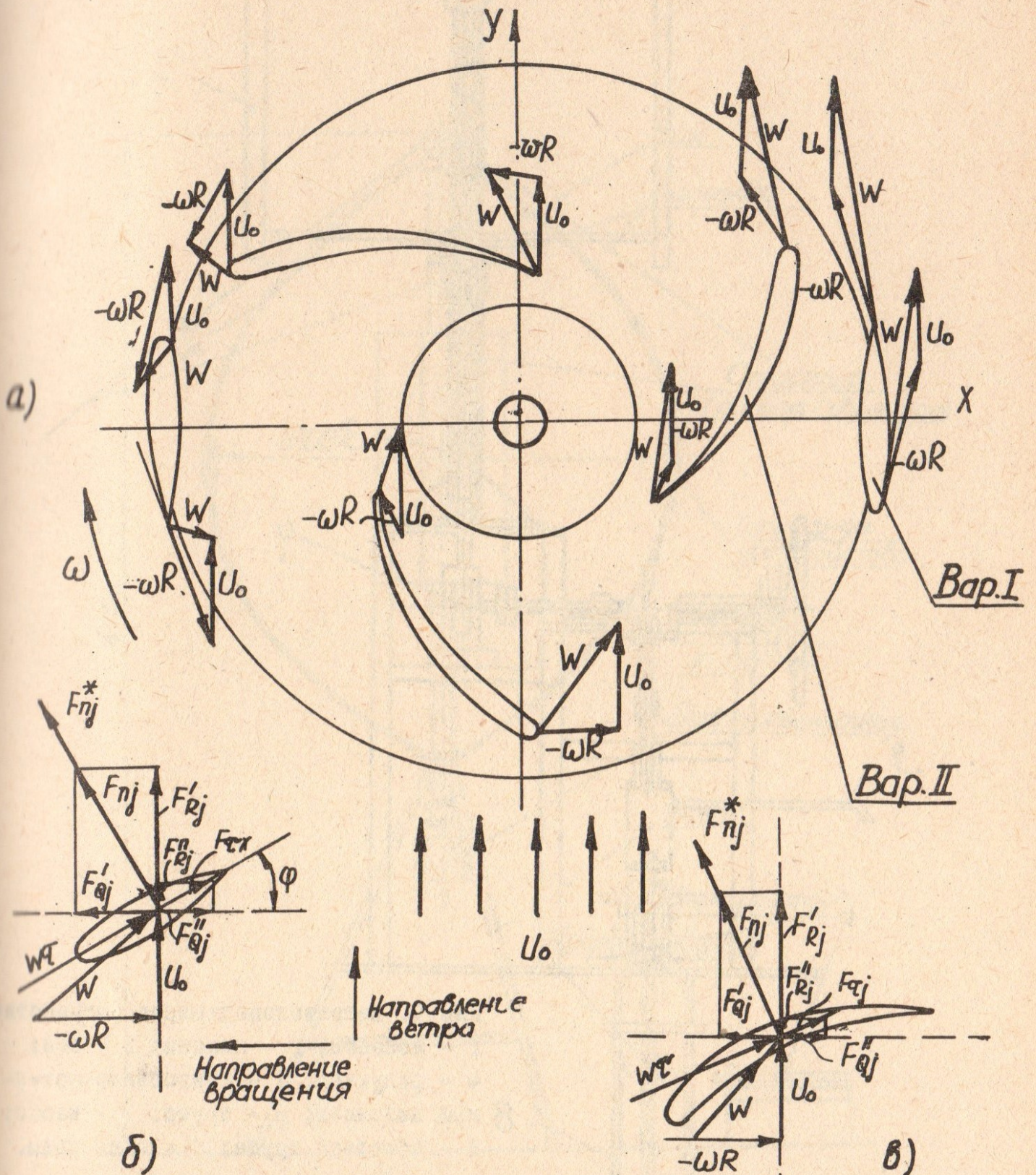


Рис. I. Рабочие лопасти ветротурбин (ВТ): Вар. I - вертикально-осевая ВТ; Вар. II - ВТ с кильовидным несимметричным профилем. Векторные схемы скоростей (а) и аэродинамических сил (б, в).

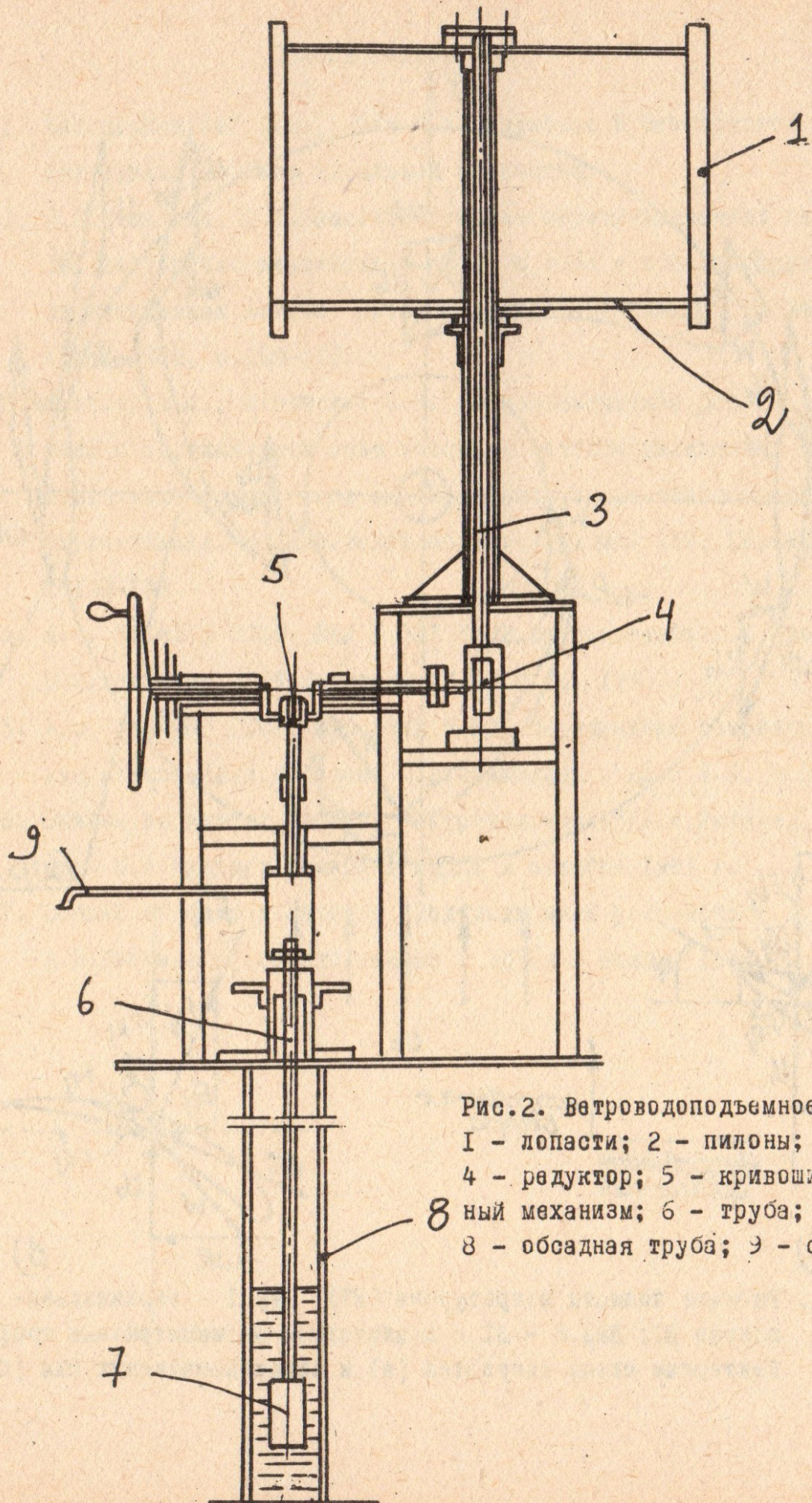


Рис. 2. Ветроводоподъемное устройство

1 - лопасти; 2 - пилоны; 3 - вал;
 4 - редуктор; 5 - кривошипно-шатун-
 ный механизм; 6 - труба; 7 - насос;
 8 - обсадная труба; 9 - слив воды.

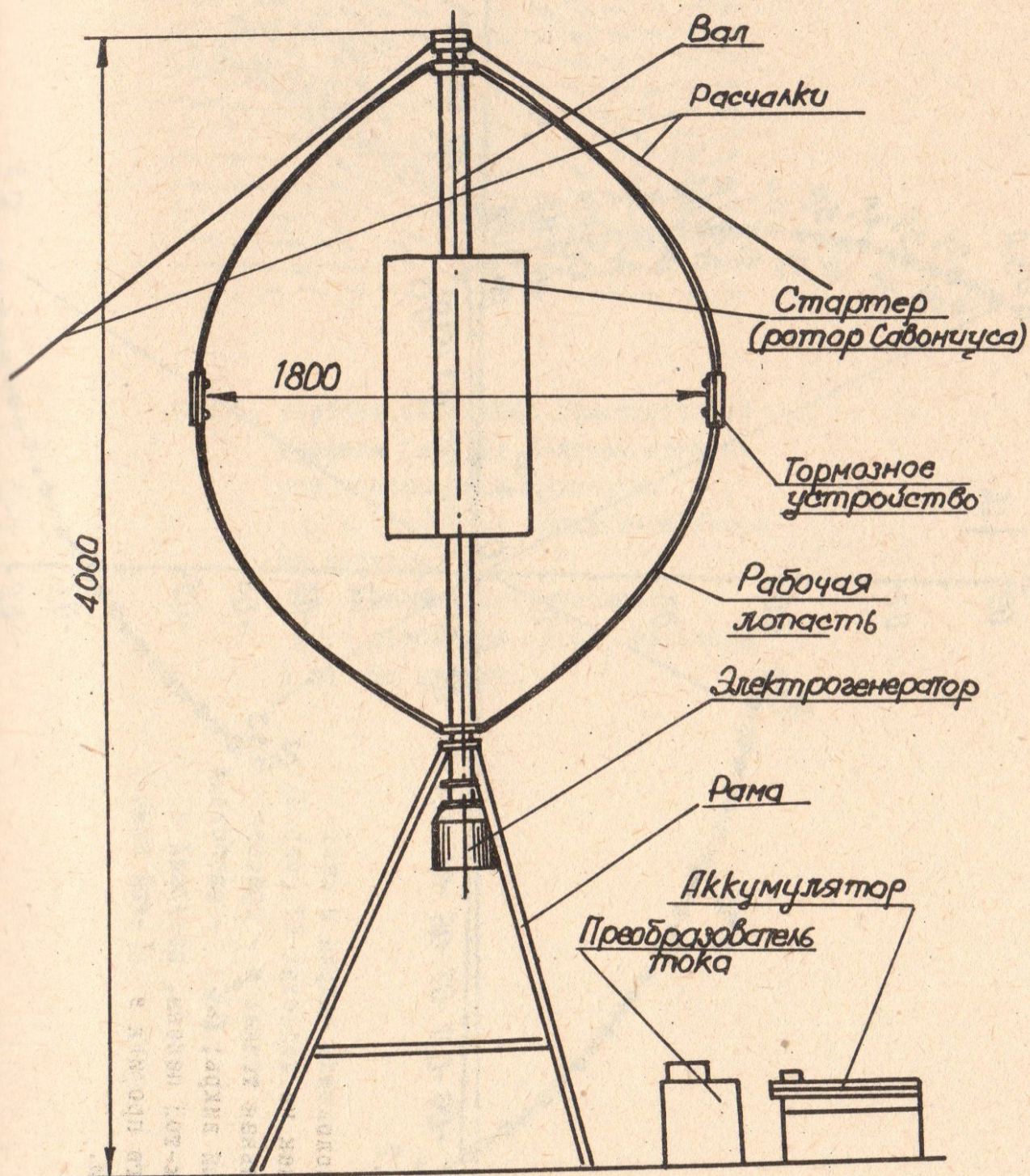


Рис. 3. Вертикально-осевой ветроагрегат.

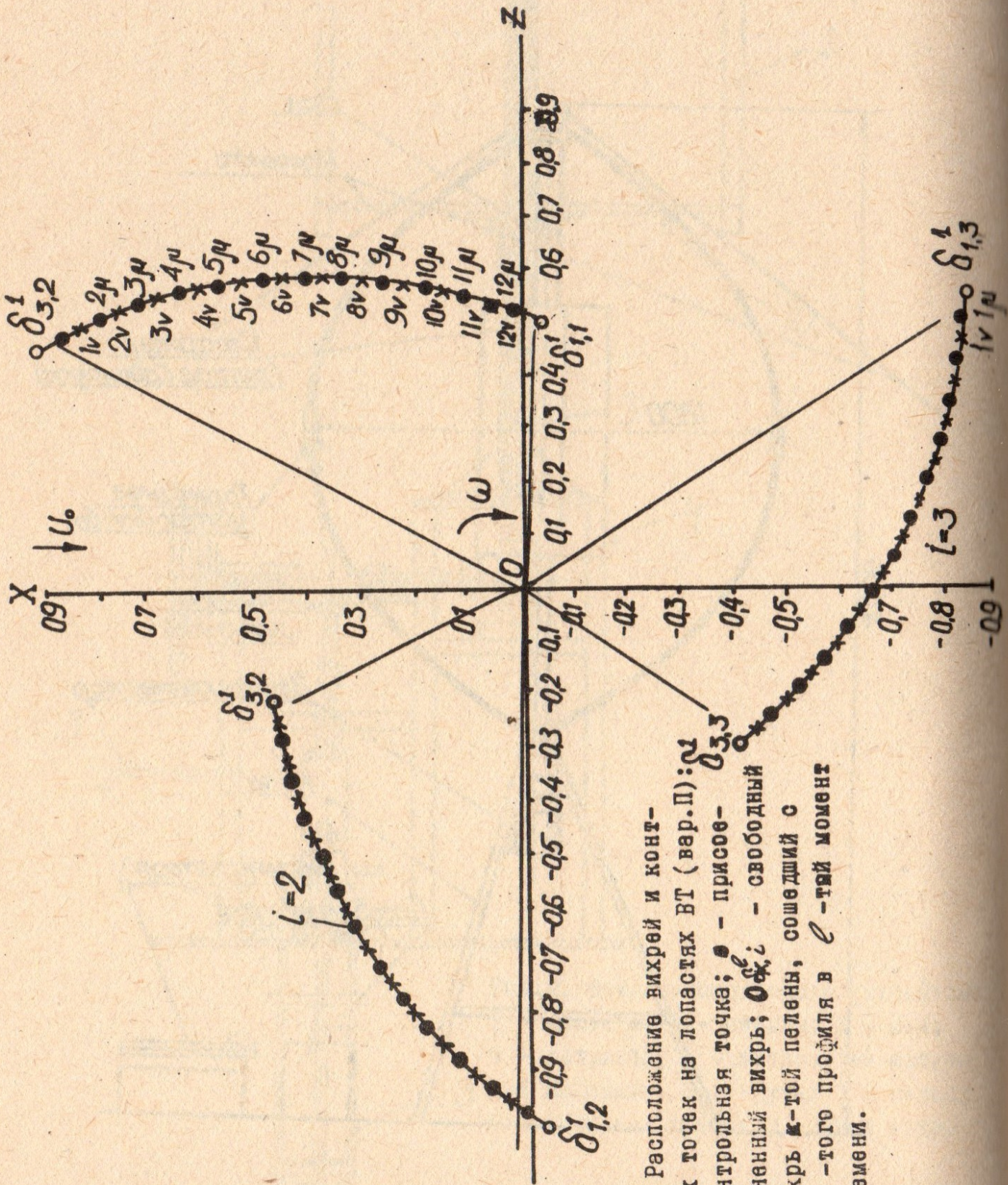


Рис. 4. Расположение вихрей и контрольных точек на лопастях ВТ (вер. П):
 x - контрольная точка; ● - присоединенный вихрь; ○ - свободный вихрь
 i - той пелены, сошедший с i - того профиля в e - той момент времени.

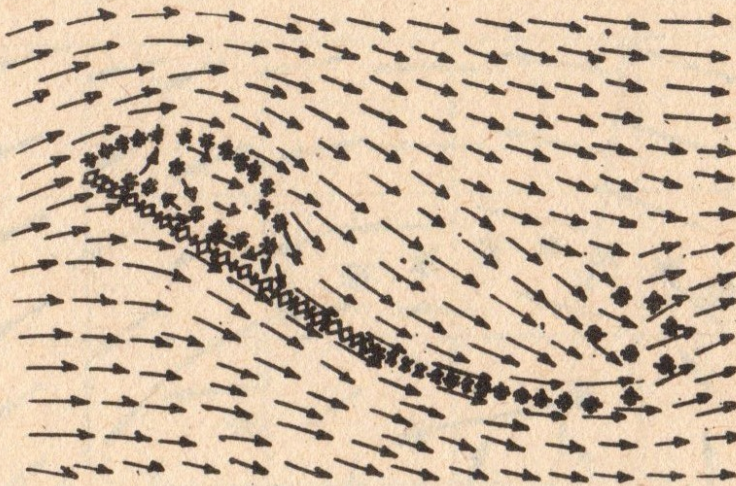


Рис. 5. Картина обтекания симметричного профиля (вар. I) потоком идеальной несжимаемой жидкости:
 + - суммарный дискретный вихрь на лопасти;
 ◊ - контрольная точка;
 * - свободный вихрь, сошедший с острых кромок.

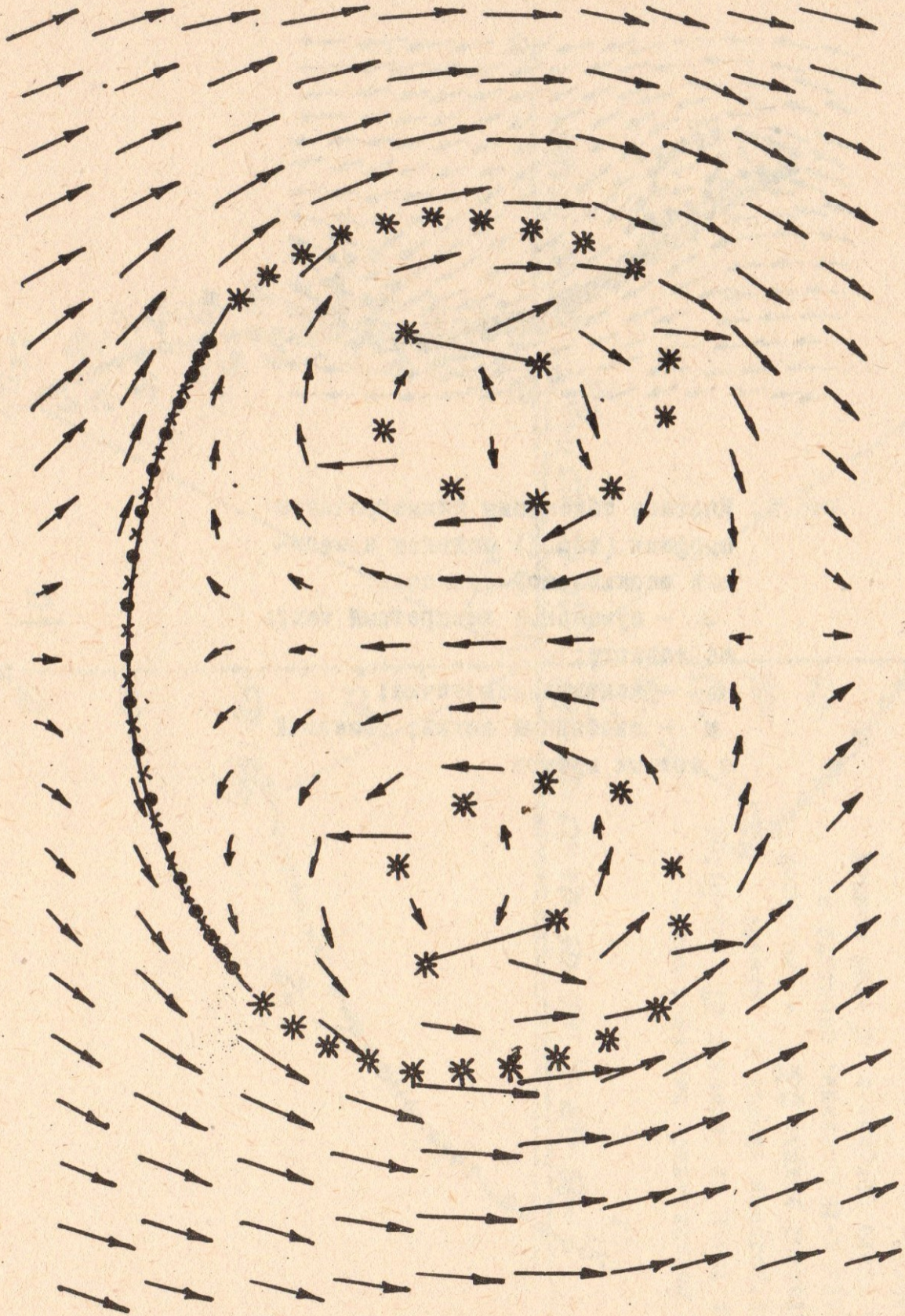


Рис. 6. Поле скоростей при обтекании крыловидного единичного профиля (вар. II) для угла атаки $\alpha = -90^\circ$; стрелы прогиба профиля $f = 0,15$; $x_c = 0,5$; обозначено: * - свободный вихрь; • - присоединенный вихрь; X - контрольная точка; \rightarrow - скорость потока в точке, находящейся в начале вектора.

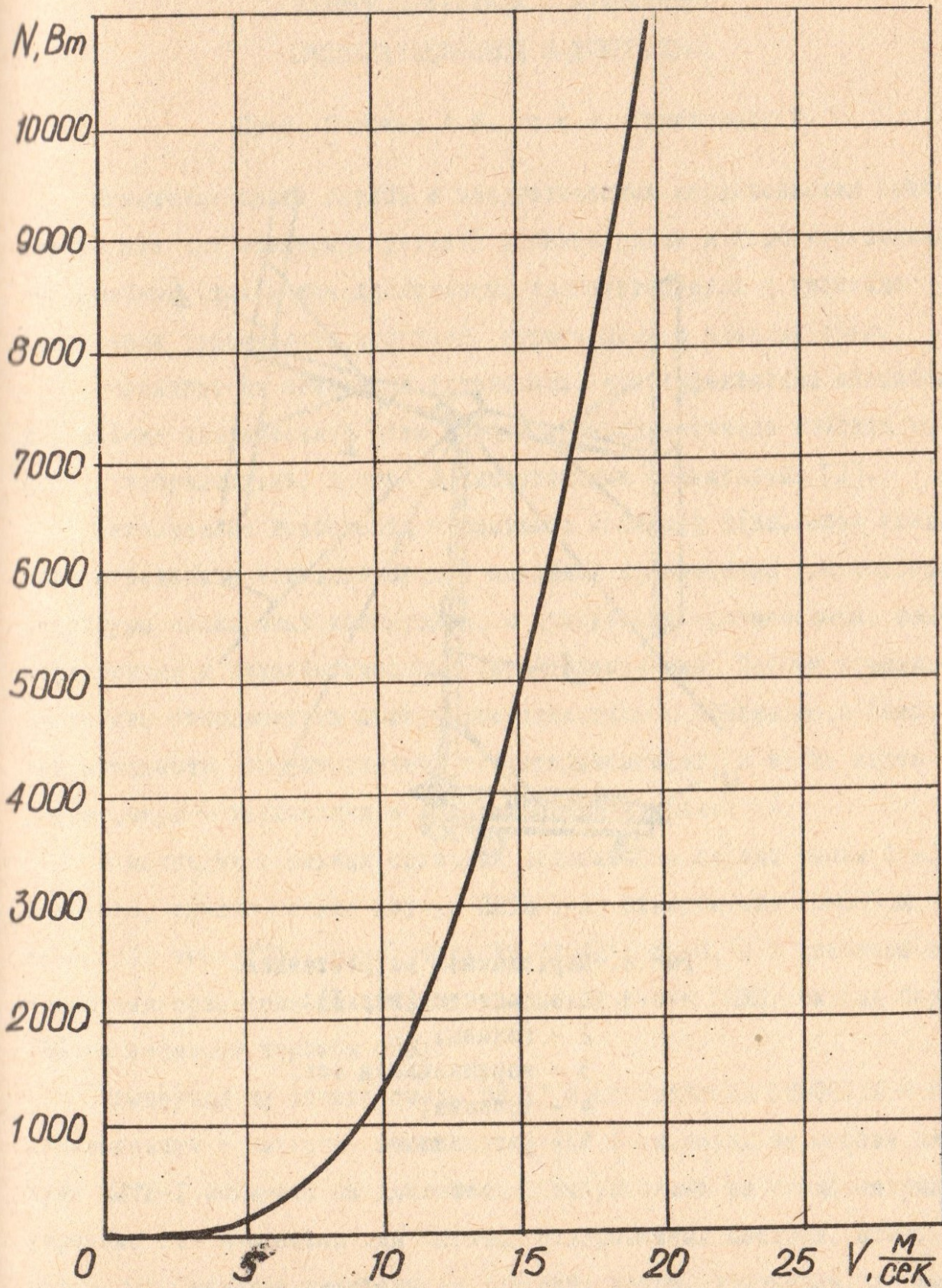


Рис. 7. Мощность ВТ (вар. П) в зависимости от скорости ветра ($D_{RT} = 1,88$ м, $l = 2,25$ м).

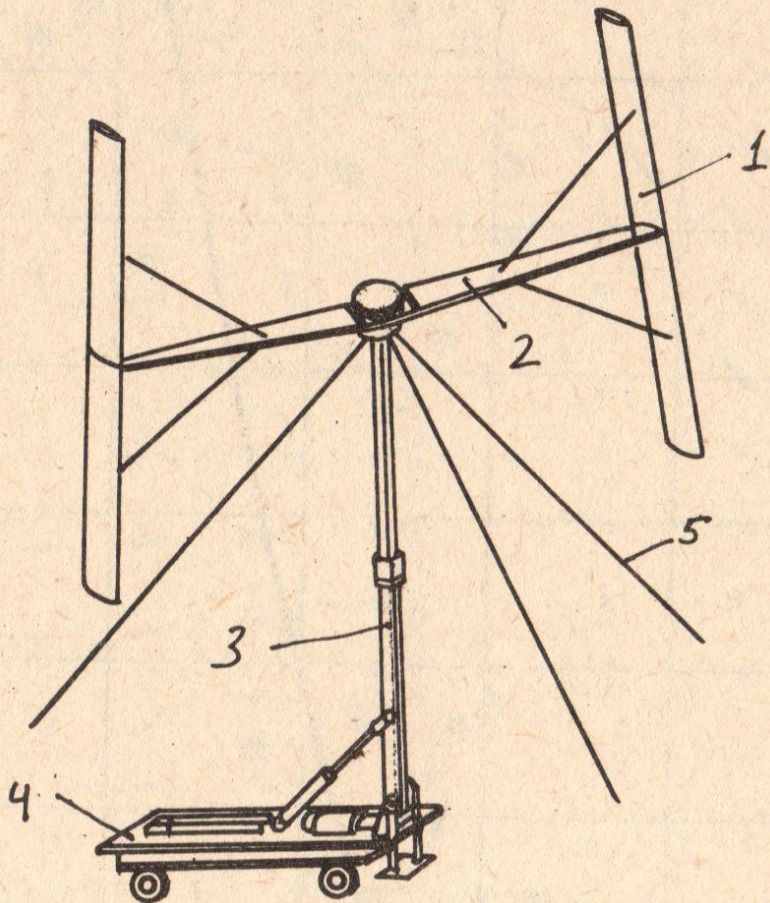


Рис. 8. Передвижная ветростанция.

- 1 - лопасти (вар. I);
- 2 - пилоны;
- 3 - вертикальная ось;
- 4 - тележка;
- 5 - растяжки.