

УДК 05.07.04.629

А.С. Крыжановский

ДИНАМИКА ФЛАТТЕРНОЙ ВЕТРОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрены ветронасосная установка, в которой в качестве ветродвигателя используется флаттерный ветродвигатель с вертикально расположенной крыловой лопастью, математическая модель, построенная для исследования динамики установки. Определены закон движения крыловой лопасти при подключенной нагрузке и основные характеристики ветронасосной установки.

В последние годы из-за увеличивающегося дефицита топливно-энергетических ресурсов все большее внимание уделяется использованию энергии возобновляемых источников и, в частности, энергии ветра, которую можно применить в различных отраслях народного хозяйства. Достаточно широкое распространение получили ветронасосные установки в сельском хозяйстве, особенно в водоснабжении для накачивания воды в резервные баки. Такие ветронасосные установки могут быть применены для механизации подъема воды на пастбищах и отдаленных фермах, орошения небольших участков овощных культур и садов, где сроки полива не так жестки, осушения заболоченных земель и т. д.

Ветронасосная установка состоит из ветродвигателя и гидравлического поршневого насоса. Наиболее распространенными являются ветродвигатели с вращающимся рабочим органом. Однако существуют ветродвигатели, в которых рабочий орган совершает колебательное движение. К ним следует отнести принципиально новые ветродвигатели – флаттерные, в которых колебания рабочего органа – крыловой лопасти – осуществляются за счет использования явления "флаттер". На сегодняшний день известны две схемы таких ветродвигателей: флаттерный ветродвигатель с горизонтально расположенной крыловой лопастью (патент № 20930 А (Украина) F 03Д5/06, автор А.А. Цымбалюк) и флаттерный ветродвигатель с вертикально расположенной крыловой лопастью (заявка на изобретение № 97104882, авторы А.А. Цымбалюк, А.С. Крыжановский, Ю. Г. Кононыхин).

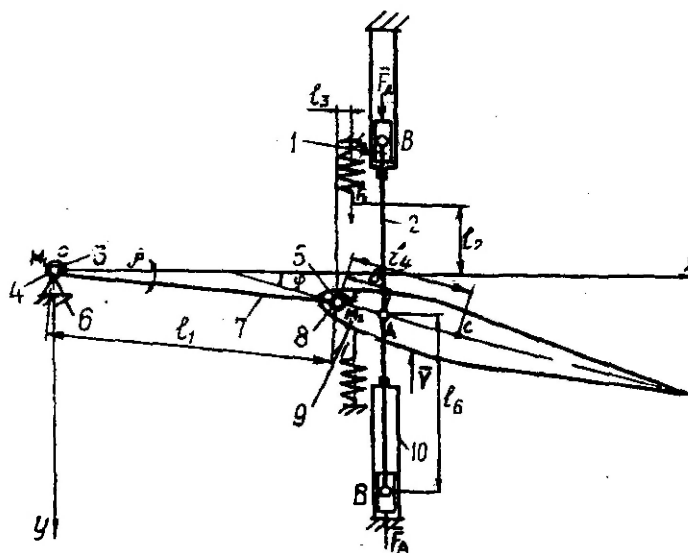


Рис. 1. Схема флаттерной ветронасосной установки

Флаттерный ветродвигатель с вертикально расположенной крыловой лопастью состоит из крыловой лопасти 9, которая установлена вертикально в потоке воздуха на двух жестких рычагах 7 с помощью вращательных кинематических пар 8 (рис. 1). Рычаги 7, в свою очередь, соединены с неподвижной стойкой 6 посредством вращательных кинематических пар 4. Между рычагами 7 и стойкой 6 введены пружины 3, а между рычагами 7 и крыловой лопастью 9 – пружины 5. Для ограничения амплитуды колебаний крыловой лопасти и обеспечения установившегося характера колебаний в конструкции ветродвигателя предусмотрены дополнительные ограничительные пружины 1, свободный конец которых удален от оси равновесия на расстоянии l_2 . К крыловой лопасти ветродвигателя посредством шатунов 2 присоединен поршневой насос двойного действия, образованный в результате соединения двух насосов простого действия 10.

В процессе работы крыловая лопасть 9 может поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр вращательных кинематических пар 8 (точка E), а совместно с рычагами 7 – вокруг оси, проходящей через центр вращательных кинематических пар 4 (точка O). Таким образом, крыловая лопасть имеет две степени свободы и ее положение в пространстве будем характеризовать двумя обобщенными координатами: φ - углом отклонения лопасти 9 от оси равновесия OX и β - углом отклонения рычагов 7 от этой оси. На точки данной колебательной системы действуют следующие силы: силы упругости пружин, аэродинамическая сила, сила давления, сила тяжести крыловой лопасти и реакции связей, принимаемые как идеальные.

В общем случае полная аэродинамическая сила раскладывается на две составляющие: подъемную силу Y , направленную перпендикулярно скорости воздушного потока, и силу лобового сопротивления X , направленную параллельно скорости потока. Так как сила лобового сопротивления намного меньше подъемной силы, то в дальнейших расчетах этой силой будем пренебрегать. Подъемная сила определяется выражением

$$Y = \frac{1}{2} K_C \rho V^2 S_K \varphi,$$

где K_C – угловой коэффициент прямой, характеризующей изменение коэффициента подъемной силы C_y ; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; V – скорость воздушного потока, м/с ; $S_K = ba$ – площадь срединной плоскости крыла, м^2 ; b – хорда крыла, м ; d – длина крыла, м .

Подъемная сила прикладывается в центре давления крыловой лопасти, который находится на расстоянии $0,25b$ от передней кромки.

Моменты сил упругости крутильных пружин 3, 5 определяют по формулам:

$$\begin{aligned} M_1 &= c_1 \beta, \\ M_2 &= c_2 (\varphi - \beta), \end{aligned}$$

где c_1 – крутильная жесткость пружин 3, находящихся между рычагами 7 и стойкой 6, $\text{Н}\cdot\text{м}$; c_2 – крутильная жесткость пружин 5, находящихся между рычагами 7 и крыловой лопастью 9, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Если амплитуда колебаний крыла превышает определенное значение, то оно будет соприкасаться с ограничительными пружинами 1. При этом возникают дополнительные силы упругости:

$$F_y = c_3 \Delta y, \quad (1)$$

где c_3 – жесткость дополнительных пружин 1, Н/м ; Δy – деформация этих пружин, м ; k – функция Кронекера:

$$k = 0, \text{ если } y_k < l_2,$$

$$k = 1, \text{ если } y_k \geq l_2,$$

y_k – ордината точки касания лопасти с ограничительными пружинами, м; l_2 – расстояние от оси равновесия лопасти OX до ограничительных пружин.

Выразив Δy через обобщенные координаты, получим:

$$\Delta y = y_k - l_2 = l_1 \sin \beta + l_3 \sin \varphi - l_2, \quad (2)$$

где l_1 – длина рычагов, м; l_3 – расстояние от точки E до ограничительных пружин.

Поскольку предполагается, что углы φ и β малы, то выражение (1) с учетом формулы (2) перепишем в виде

$$F_y = k c_3 (l_1 \beta + l_3 \varphi - l_2).$$

Сила давления жидкости на поршень насоса определяется по формуле

$$F_d = p S_{\Pi}, \quad (3)$$

где p – полное давление на поршень, Па; S_{Π} – площадь поршня насоса, м².

Для насоса двойного действия полное давление находят следующим образом:

$$p = \rho_1 g (H_v + H_n),$$

где ρ_1 – плотность воды, кг/м³; H_v – высота всасывания, м; H_n – высота нагнетания, м.

Учитывая, что площадь поршня

$$S_{\Pi} = \pi R_{\Pi}^2,$$

где R_{Π} – радиус поршня, выражение (3) перепишем в виде

$$F_d = \pi R_{\Pi}^2 \rho_1 g (H_v + H_n).$$

Эта сила всегда направлена противоположно движению крыловой лопасти.

Для составления уравнений движения крыловой лопасти воспользуемся уравнением Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} + \frac{\partial \Pi}{\partial \beta} = Q_{\beta}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = Q_{\varphi},$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Q_{β} , Q_{φ} – обобщенные силы.

Кинетическая энергия системы определяется выражением:

$$T = 2T_1 + T_2 + 2T_3, \quad (5)$$

где T_1 – кинетическая энергия рычага; T_2 – кинетическая энергия крыловой лопасти; T_3 – кинетическая энергия поршня насоса.

Рычаги совершают вращательное движение, поэтому

$$T_1 = \frac{1}{2} J_0 \dot{\beta}^2, \quad (6)$$

где J_0 – момент инерции рычага относительно оси вращения, проходящей через точку O , кг·м².

Так как крыловая лопасть совершает плоскопараллельное движение, то ее кинетическая энергия определяется по формуле Кенига:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_c^2 + \frac{1}{2} J_c \dot{\varphi}^2,$$

где m_2 – масса крыловой лопасти, кг; V_c – скорость центра масс крыла, м/с; J_c – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс C , кг·м².

Скорость центра масс найдем из выражения

$$V_c^2 = \dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2, \quad (7)$$

где \dot{x}_c и \dot{y}_c – компоненты скорости движения по осям декартовой системы координат.

Выразим декартовые координаты центра масс через обобщенные координаты с учетом малости углов φ и β :

$$\begin{aligned} x_c &= l_1 + l_4, \\ y_c &= l_1 \beta + l_4 \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

где l_4 – расстояние от точки E до центра масс C , м.

После дифференцирования уравнения (8) и подстановки соответствующих выражений в формулу (7) получим:

$$V_c^2 = l_1^2 \dot{\beta}^2 + 2l_1 l_4 \dot{\beta} \dot{\varphi} + l_4^2 \dot{\varphi}^2.$$

Тогда

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} J_E \dot{\varphi}^2 + m_2 l_1 l_4 \dot{\beta} \dot{\varphi}, \quad (9)$$

где $J_E = J_c + m_2 l_4^2$ – момент инерции относительно оси, проходящей через точку E , кг·м².

Кинетическая энергия поршня насоса определяется выражением

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_B^2, \quad (10)$$

где m_3 – масса поршня, кг; V_B – скорость поршня насоса, м/с.

Для нахождения скорости V_B выразим декартовые координаты поршня через обобщенные координаты φ и β с учетом их малости:

$$\begin{aligned} x_B &= l_1 + l_5, \\ y_B &= l_1 \beta + l_5 \varphi + l_6, \end{aligned} \quad (11)$$

где l_5 – расстояние от точки E до точки A , м; l_6 – длина шатуна 9, м.

После дифференцирования уравнений (11) определим скорость поршня:

$$V_B^2 = \dot{x}_B^2 + \dot{y}_B^2 = l_1^2 \dot{\beta}^2 + l_5^2 \dot{\varphi}^2 + 2l_1 l_5 \dot{\beta} \dot{\varphi}.$$

Тогда выражение (10) перепишем в виде:

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 (\ell_1^2 \dot{\beta}^2 + \ell_5^2 \dot{\varphi}^2 + 2\ell_1 \ell_5 \beta \dot{\varphi}). \quad (11)$$

Таким образом, подставляя выражения (6), (9), (12) в уравнение (5), найдем полную кинетическую энергию системы:

$$T = J_0 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_2 \ell_1^2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} J_E \dot{\varphi}^2 + m_2 \ell_1 \ell_4 \dot{\beta} \dot{\varphi} + m_3 \ell_1^2 \dot{\beta}^2 + m_3 \ell_5^2 \dot{\varphi}^2 + 2m_3 \ell_1 \ell_5 \beta \dot{\varphi}. \quad (12)$$

Потенциальная энергия системы представляет собой потенциальную энергию пружин 3, 5, которая определяется выражением:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_1 \beta^2 + \frac{1}{2} c_2 (\varphi - \beta)^2. \quad (13)$$

Обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам φ и β , равны:

$$\begin{aligned} Q_\beta &= -Y \ell_1 - F_y \ell_1 - F_D \ell_1; \\ Q_\varphi &= Y(0,25b - x_0) - F_y \ell_3 - F_D \ell_5, \end{aligned} \quad (14)$$

где x_0 — расстояние от передней кромки крыла до точки E , м.

После подстановки выражений (13), (14), (15) в уравнение (4) и выполнения соответствующих преобразований, получим дифференциальные уравнения, характеризующие движение крыловой лопасти флаттерной ветронасосной установки:

$$\begin{aligned} & (2J_0 + m_2 \ell_1^2 + 2m_3 \ell_1^2) \ddot{\beta} + (m_2 \ell_1 \ell_4 + 2m_3 \ell_1 \ell_5) \ddot{\varphi} + c_1 \beta + c_2 \varphi - c_2 \varphi = \\ & 0 = -\frac{1}{2} k_C \rho b d V^2 \ell_1 \varphi - k \ell_1 c_3 (\ell_1 \beta + \ell_3 \varphi - \ell_2) - \pi R_H^2 \rho_1 g \ell_1 (H_B + H_H), \\ & (m_2 \ell_1 \ell_4 + 2m_3 \ell_1 \ell_5) \ddot{\beta} + (J_E + 2m_3 \ell_5) \ddot{\varphi} - c_2 \beta + c_2 \varphi = \\ & = -\frac{1}{2} k_C P b d v^2 (0,25b - x_0) \varphi - k \ell_3 c_3 (\ell_1 \beta + \ell_3 \varphi - \ell_2) - \pi R_H^2 g \ell_5 (H_e + H_H). \end{aligned} \quad (16)$$

Система дифференциальных уравнений (16) позволяет исследовать работу флаттерной ветронасосной установки, найти изменение во времени обобщенных координат $\beta = \beta(t)$ и $\varphi = \varphi(t)$ и соответственно основные характеристики ветронасосной установки.

Результаты расчетов на ЭВМ показывают, что при скорости ветра больше критической скорости флаттера происходит постепенное увеличение по экспоненциальному закону обобщенных координат φ и β (рис. 2).

Перемещение же поршня в цилиндре и соответственно включение насосной установки в работу наблюдается лишь после того, как углы φ и β достигнут определенных значений (рис. 3). При этом дальнейший рост обобщенных координат прекращается, и колебания лопастей приобретают установившийся характер (см. рис. 2).

Время t выхода ветронасосной установки на рабочий режим зависит от скорости ветра V и начальных условий системы $\varphi(0)$ и $\beta(0)$ (рис. 4). Чем больше скорость ветра и начальное отклонение крыловой лопасти и рычагов от оси равновесия, тем быстрее начинает работать гидравлический насос.

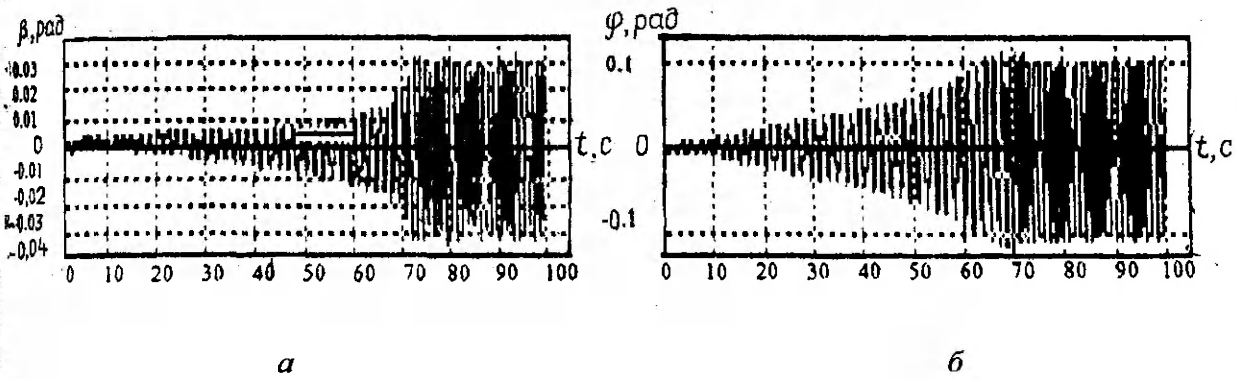


Рис. 2. Закон движения крыловой лопасти флаттерной ветронасосной установки:
а – по обобщенной координате β ; б – по обобщенной координате φ

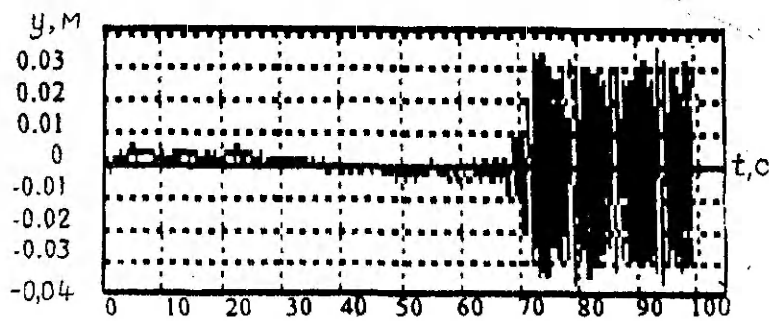


Рис. 3. Закон движения поршня флаттерной ветронасосной установки

Для более быстрого вывода на рабочий режим флаттерной ветронасосной установки ветродвигатель можно разгонять и без нагрузки. Лишь после того, как амплитуда колебаний крыловой лопасти достигнет определенных значений, подключается поршневой насос. Для этого в цилиндре насоса предусматривается дополнительный вентиль, при открытии которого происходит выравнивание давления внутри цилиндра и за его пределами. Такое включение позволяет уменьшить время в четыре-шесть раз, однако при этом требуется обязательное присутствие человека.

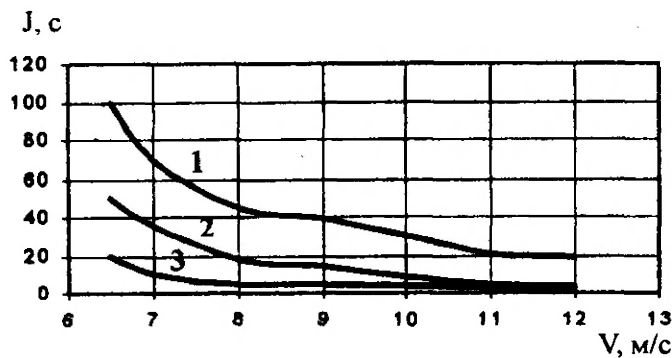


Рис. 4. Зависимость времени выхода установки на рабочий режим от скорости ветра при различных начальных условиях:
1 – $\beta(0) = 0,001; \varphi(0) = 0,005$; 2 – $\beta(0) = 0,03$;
 $\varphi(0) = 0,03$; 3 – $\beta(0) = 0,035; \varphi(0) = 0,035$

Основными характеристиками ветронасосной установки являются подача, полезная мощность, коэффициент использования энергии ветра.

Подача насоса Q представляет собой количество жидкости, подаваемое насосом в единицу времени, и может быть определена, как произведение площади поршня на его скорость:

$$Q = S_{\text{п}} V_{\text{в.}}$$

Поскольку с увеличением скорости ветра ход поршня и его скорость увеличиваются (рис. 5), то соответственно будет увеличиваться и подача насоса (рис. 5, а).

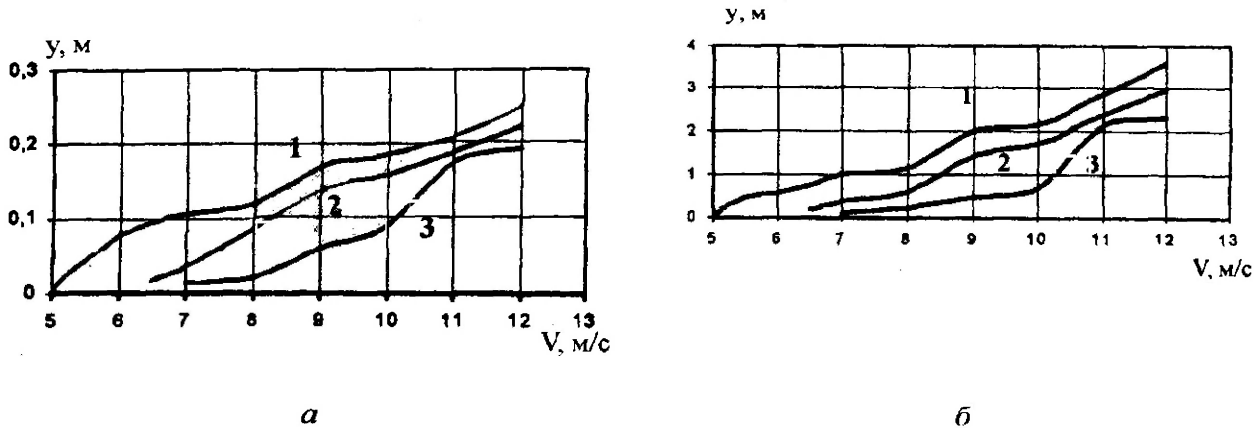


Рис. 5. Зависимость перемещения (а) и скорости (б) поршня ветронасосной установки от скорости ветра при различной нагрузке:

$$1 - F_{\text{д}} = 97 \text{ Н}; 2 - F_{\text{д}} = 172 \text{ Н}; 3 - F_{\text{д}} = 269 \text{ Н}$$

В процессе работы насос поднимает на высоту H некоторое секундное количество воды весом

$$G = Q \rho_1 g.$$

Поэтому полезная мощность N_H насоса определяется следующим образом:

$$N_H = \frac{Q \rho_1 g H}{102}.$$

Так как мощность пропорциональна подаче насоса, то с увеличением скорости ветра она изменяется таким же образом, то есть увеличивается (рис. 6, б).

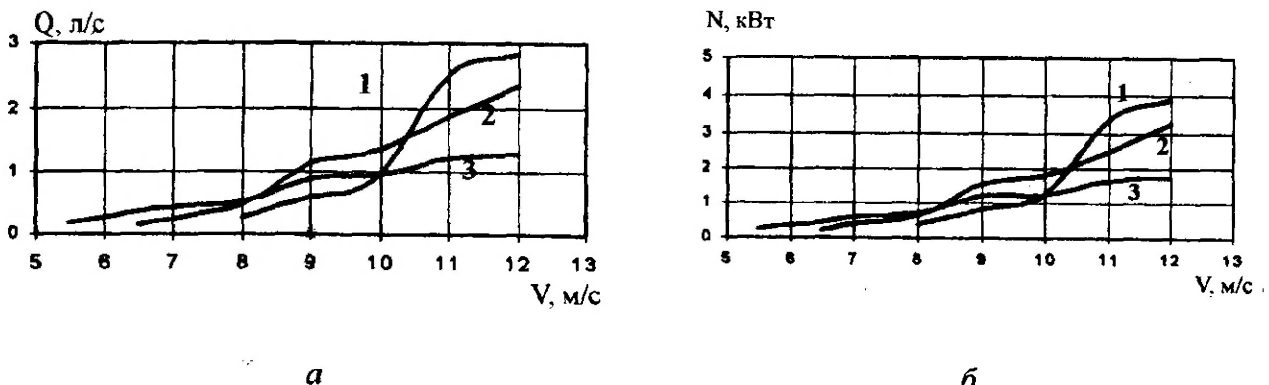


Рис. 6. Зависимость подачи (а) и мощности (б) ветронасосных установок от скорости ветра при различной нагрузке:

$$1 - F_{\text{д}} = 269 \text{ Н}; 2 - F_{\text{д}} = 172 \text{ Н}; 3 - F_{\text{д}} = 97 \text{ Н}$$

Обычно в ветронасосных установках часть энергии воздушного потока, которую ветродвигатель преобразовывает в механическую энергию, принято оценивать коэффициентом использования энергии ветра ξ . Его можно найти как отношение полезной мощности насоса к мощности воздушного потока, проходящего через ометаемую поверхность:

$$\xi = \frac{N_H}{N_B},$$

где N_B – мощность воздушного потока:

$$N_B = S_{ВП} \frac{\rho V^3}{2},$$

$S_{ВП}$ – площадь ометаемой поверхности, m^2 .

Изменение коэффициента использования энергии ветра при работе флаттерной ветронасосной установки при разных скоростях ветра и нагрузках показано на рис.7. Убывание коэффициента по мере увеличения скорости ветра неизбежно в силу того, что мощность воздушного потока изменяется пропорционально кубу скорости ветра, в то время как мощность насоса пропорциональна лишь первой степени скорости поршня.

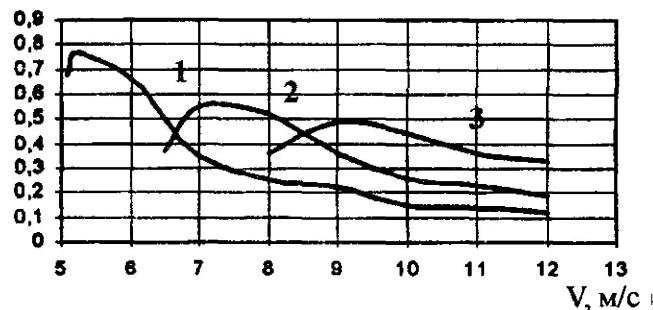


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования энергии ветра от скорости ветра при различной нагрузке:

1 – $F_d = 97$ Н; 2 – $F_d = 172$ Н; 3 – $F_d = 269$ Н

Проведенные исследования построенной математической модели позволяют сделать вывод, что предложенная флаттерная ветронасосная установка является работоспособной.

Стаття надійшла до редакції 8 грудня 1998 року.

Андрій Станіславович Крижановський (1970) закінчив Київський політехнічний інститут у 1993 році. Асистент кафедри «Теорія механізмів і машин та деталей машин» Київського міжнародного університету цивільної авіації. Займається дослідженнями флаттерних вітроперетворювачів. Має 8 друкованих робіт.

Andriy S. Kryzhanovskyi (b. 1970) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1993). Assistant of Theory of Mechanisms and Machines and Parts of Machines Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Specializes in the field of flutter wind transformers. Author of 8 publications.