

Гомельская научно-практическая конференция  
учащихся  
*по естественно-научным направлениям*  
«ПОИСК»

Государственное учреждение образования  
«Красновский ясли-сад – средняя школа»

Учебно-исследовательская работа

«ПАРУСНАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ»

Учениц ГУО «Красновский ясли-  
сад – средняя школа»

Зыкун Валентины (9 класс),

Егоровой Елены (8 класс)

Научный руководитель - учитель  
информатики ГУО «Красновский  
ясли-сад – средняя школа»

Козлов Павел Тихонович

Гомель, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Основная часть	4
2.1 История проведения работы	4
2.2 Теоретические расчёты	7
2.3 Практические исследования	11
3. Заключение	13
Список литературы	14
Приложения	

## 1. ВВЕДЕНИЕ

### ЦЕЛЬ ПРОЕКТА:

Разработка и создание действующей модели альтернативного источника электроэнергии, исследование его работы.

### ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

- Создать действующую модель ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения.
- Провести исследования и определить возможности использования ветроустановок этого типа как источника электроэнергии.
- Обобщить теоретический и экспериментальный материал с определением его возможного использования

Работу над нашей ветроустановкой мы начали в 2012 году. К работе над данным проектом нас подтолкнули нельзя сказать, чтобы частые, но довольно неприятные отключения электроэнергии. Так как отключения случались в основном из-за сильного ветра, мы решили именно его использовать в качестве источника энергии. В последующие годы отключения случались крайне редко, кроме того цены на ископаемые энергоносители сильно снизились, и мы решили исследовать практическую рентабельность использования ветроэнергетических установок нашего типа.

В своей модели мы решили использовать парус, который двигаясь по окружности, приводит в движение установку, создавая в каждой точке по возможности положительную силу.

Актуальность работы: запасы не возобновляемых сырьевых источников энергии — нефти, газа и угля в обозримом будущем будут исчерпаны. Кроме того опустошение земных запасов и сжигание топлива ухудшают ее экологию. Задача освоения экологически чистых, возобновляемых источников энергии сейчас по-

прежнему актуальна. Энергия Солнца и ветра неисчерпаемы и их использование не наносит никакого вреда природе (почти никакого).

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 ИСТОРИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Одной из основных задач нашего проекта было создание наиболее простой в изготовлении, из дешевых материалов и доступного оборудования, неприхотливой и долговечной в эксплуатации ветроэнергетической установки.

Мы решили использовать ветроустановку с вертикальной осью вращения из-за основных её преимуществ – отсутствие необходимости изменения ориентации относительно направления ветра, меньшее количество деталей которые двигаются, следовательно стоимость ремонта и затраты на производство менее значительные, более низкая скорость вращения и как следствия – меньше шума и вреда пролетающим птицам.

У первой нашей модели паруса располагались горизонтально (*Приложение 1, фото 1*), но из-за невозможности значительно увеличить площадь паруса (мы уже определили, что мощность установки зависит от скорости ветра и площади парусов), а увеличение количества модулей усложняло изготовление, мы изготовили модель с расположением парусов в вертикальной плоскости (*Приложение 1, фото 2*),

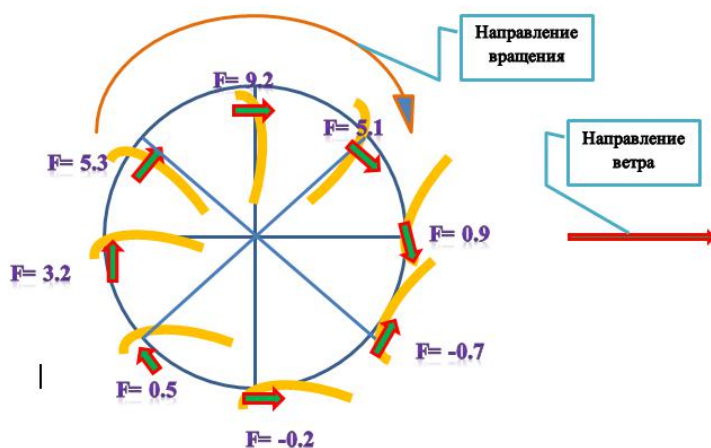
Следующая модель отличается большей площадью паруса (0,33 м<sup>2</sup>), материалом паруса и устойчивостью (*Приложение 1, фото 3*).

В четвёртой модели мы увеличили количество парусов до четырёх и изменили (с целью усиления) крепление парусов к вертикальной стойке (*Приложение 1, фото 4*).

В пятой модели ветроустановке мы придали парусам-пластинам профиль крыла, разнесли крепление парусов. (*Приложение 1, фото 5*). Заменили электродвигатель постоянного тока (он выполнял у нас роль генератора) на учебный генератор постоянного тока с промежуточным валом для увеличения частоты вращения генератора. Была у нас попытка изготовить генератор самостоятельно (с целью уменьшить потери а трансмиссии): собрали

электрогенератор установив на оси ветроустановки неодимовые магниты ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ), а на стойках 4 катушки (учебные трансформаторы) и собрали цепь с использованием диодов и конденсаторов, пытаясь таким образом исключить потери в трансмиссии. Следует отметить, что этот опыт оказался не удачным. Наш электрогенератор при скорости ветра 4 м/с создавал напряжение около 4 в при последовательном соединении первичных катушек трансформаторов, силу тока наш амперметр «не заметил». При работе генератора около 3 минут заряжался конденсатор и после замыкания цепи лампочка напряжением 3,5 в, 0,3 вт горела меньше секунды.

Следует отметить, что с каждой из ветроустановок мы проводили следующие эксперименты: на отдельном парусе-крыле с помощью динамометра измерили силу давления ветра перпендикулярного парусу при разных скоростях ветра, силу «лобового» сопротивления воздуха с прямым и изогнутым парусом, «подъёмную силу» крыла при разных скоростях ветра, величину силы действующей на одно крыло в точках через  $45^\circ$  по направлению вращения при скорости ветра 4 м/с:



Результат: при скорости ветра 5 м/с и скорости паруса 2 м/с чуть более 6 ватт ( $U=4,3$   $I=1,4$  А). Расчётная мощность – 12,5 вт. Следовательно К.П.Д. нашей установки не превысил 50%.

<b>V1-скорость ветра</b>	<b>V2-скорость паруса</b>	<b>P-мощность без подъёмной силы</b>	<b>P1- мощность подъёмной силы</b>	<b><math>\rho</math>-плотность воздуха</b>	<b>S-площадь паруса</b>	<b>P<sub>p</sub> - полная мощность</b>
------------------------------	-------------------------------	--	--	--	-----------------------------	--

5	2	7,43	5,06	1,29	0,32	12,49
---	---	------	------	------	------	-------

Определение скорости ветра.

Так как школьный прибор для этой цели был неисправен, мы использовали воздушный шарик и секундомер. Расстояние, которое пролетал шарик, делили на время его преодоления. (Приложение 1, фото 6). Одновременно мы измеряли силу, действующую на пластину расположенную перпендикулярно ветру. Опыт повторяли многократно при различных скоростях ветра. Установили зависимость силы действующей на пластину от скорости ветра и площади пластины

$F = C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_B^2$  и использовали её для определения скорости ветра:

$$V_B = \sqrt{\frac{F}{\rho S C_x}}$$

где:  $F$  – сила давления воздушного потока,  $\rho$  – плотность воздуха 1,29 [кг/м<sup>3</sup>],  $S$  – площадь поперечного сечения пластины,  $V_B$  – скорость потока воздуха [м/с],  $C_x$  – коэффициент сопротивления в зависимости от формы, в нашем случае  $C_x = 1,3$ .

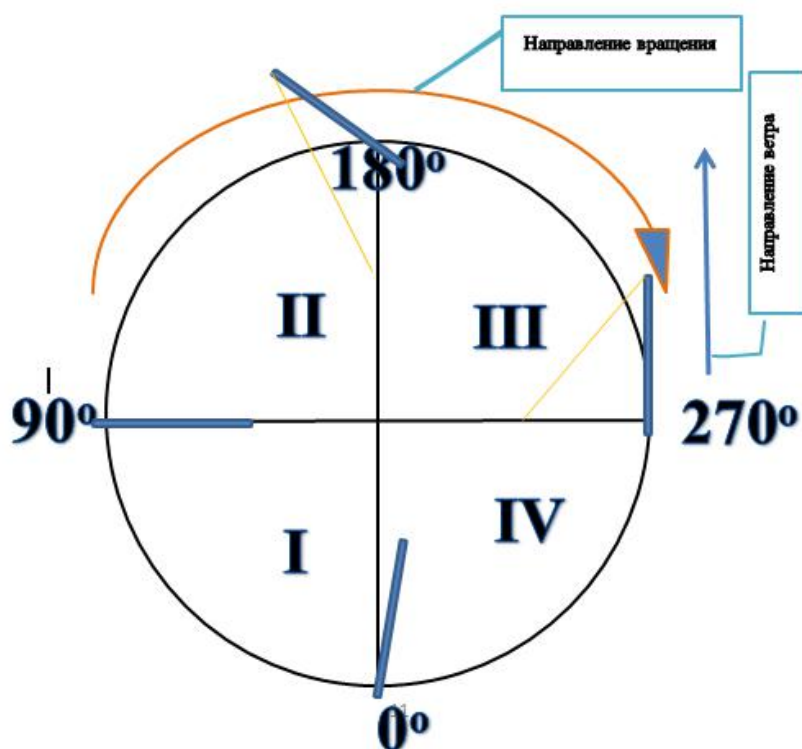
Из различных типов ветроустановок выбрали оптимальный по нашему мнению вариант: установку с вертикальным ротором и поворотом парусов в вертикальной плоскости, площадью паруса 1 м<sup>2</sup>, с ограничителем поворота паруса.

## 2.2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ

Для расчёта мощности ветроустановки мы применили формулы из школьного курса физики:  $P=F \cdot V_{\text{п}}$ , расчёта силы  $F=m \cdot a$ , ускорения  $a=(V_{\text{в}} - V_{\text{по}})/t$ , массы  $m=\rho \cdot V$ , объёма  $V=S \cdot l$ , длины  $l=(V_{\text{в}} - V_{\text{по}}) \cdot t$

Где  $P$  – мощность,  $F$  – сила (в нашем случае сила давления воздушного потока),  $V_{\text{п}}$  – скорость (– линейная скорость движения паруса),  $m$  – масса воздуха,  $a$  – ускорение  $V_{\text{в}}$  – скорость ветра,  $V_{\text{по}}$  – скорость паруса относительно скорости ветра,  $\rho$  – плотность воздуха,  $V$  – объём,  $t$  – время.

Преобразовав формулу и с учётом коэффициента сопротивления для плоской пластины  $C_x$  (в нашем случае =1,3) получили следующую формулу для расчёта мощности в I и II четвертях при движении по окружности (0–180°).



$$P=C_x \cdot \rho \cdot S \cdot (V_{\text{в}} - V_{\text{по}})^2 \cdot V_{\text{п}}$$

Учитывая, что при движении по окружности проекция площади перпендикулярной ветру будет  $S = S \cdot \sin(\alpha)$ , а скорость паруса относительно ветра  $V_{\text{по}}= V_{\text{п}} \cdot \sin(\alpha)$

получим  $P=C_x \cdot \rho \cdot S \cdot \sin(\alpha) \cdot (V_v - V_n \cdot \sin(\alpha))^2 \cdot V_n$

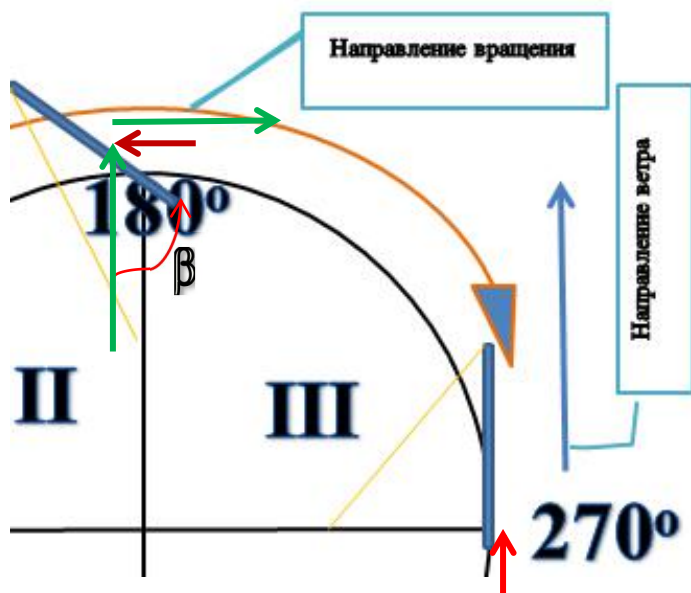
Из полученной формулы видно, что мощность зависит от скорости паруса: если скорость паруса равна нулю – мощность равна нулю, скорость паруса немного превысит скорость ветра – мощность также будет равна нулю. С помощью ЭТ (приложение 2) мы получили что максимальная мощность на данном отрезке (0–180°) будет достигаться при скорости паруса относительно скорости ветра  $V_n=0,44 \cdot V_v$ , коэффициент  $C_x=1,3$  получим:

$$P=1/2 \cdot \eta \cdot 0,317 \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3$$

и сравнивая с формулой Жуковского  $P = 1/2 \eta \zeta \rho S V^3$

(Теоретическое значение коэффициента использования энергии ветра  $\zeta$  равно 0,59. Практически же этот коэффициент в современных конструкциях составляет примерно 0,45 – 0,48;  $\eta$  – коэффициент полезного действия) получим, что в I и II четвертях коэффициент использования энергии ветра  $\zeta$  равен (0,317)

При движении паруса в III четверти (180°–270°) на парус будут действовать силы: положительная  $F_1$  → и отрицательные  $F_2$  ← и  $F_3$  ↑



Величины сил будут зависеть от скорости ветра, скорости паруса, угла  $\alpha$  ( $180^\circ < \alpha < 270^\circ$ ), и угла  $\beta$  (угол между направлением ветра и парусом), начальное значение которого  $x$  мы устанавливаем с помощью гибкого ограничителя и при вращении уменьшается ( $x < \beta < 0^\circ$ ):

$F_1 = C_x * \rho * S * y * (-\cos(\alpha))(V_B - V_n * \sin(\alpha))^2$ , где  $y = \cos(\beta)$  при ( $45^\circ < \beta < 90^\circ$ ) и  $\sin(\beta)$  при ( $0^\circ < \beta < 45^\circ$ )

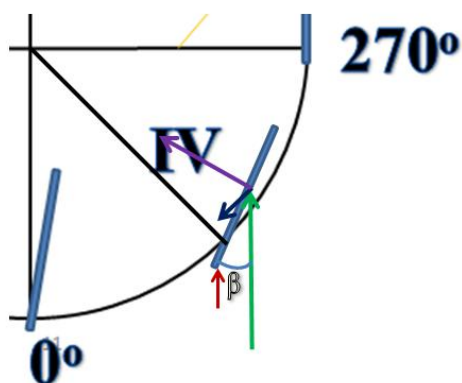
$$F_2 = C_x * \rho * S * \cos(\beta) * (V_n * \cos(\alpha))^2$$

$F_3 = C_x * \rho * S_1 * (V_B - V_n * \sin(\alpha))^2$ ,  $S_1$  примем равной  $1/40 * S$  (площадь ребра паруса)

Следовательно, мощность  $P = (F_1 - F_2 - F_3) * V_n$ , учитывая, что в I и II четвертях расчётная максимальная мощность достигается при линейной скорости паруса  $0,44 V_B$  скорости ветра и учитывая что в III четверти радиус центра паруса увеличивается примерно на  $1/3$  линейная скорость паруса будет также на  $1/3$  больше,  $V_n = 0,58 * V_B$

С помощью ЭТ (приложение 2) мы получили что максимальная мощность на данном отрезке ( $180^\circ - 270^\circ$ ) будет достигаться при скорости паруса относительно скорости ветра  $V_n = 0,58 * V_B$ , и начальном значении  $\beta = 68^\circ$  среднее значение  $\sin(\alpha) = 0,63$ , и подставив значение коэффициента  $C_x = 1,3$  получим:  $P = 0,306 * \rho * S * V_B^3$  – в третьей четверти коэффициент использования энергии ветра практически равен максимальному теоритическому.

В четвёртой четверти ( $270^\circ - 360^\circ$ ) движения паруса по окружности на него действуют силы: давления ветра  $F_1 \rightarrow$  центробежная  $F_2 \rightarrow$  и сопротивления  $F_3 \leftarrow$



$F_2 = m * V_B^2 / R$  – действие центробежной силы компенсируется гибким ограничителем и давлением ветра, величину угла  $\beta$  устанавливаем с

помощью регулировки ограничителя и массы паруса таким образом, чтобы сила была максимальной. Проекция силы к направлению вращения будет равна

$$F_1 = C_x * \rho * S * \sin^2(\beta) * \cos(\beta) * (V_B - V_{\Pi} * \sin(\alpha))^2,$$

$$F_3 = C_x * \rho * S_1 * (V_B - V_{\Pi} * \sin(\alpha))^2; \quad S_1 \text{ примем равной } 1/40 * S$$

$P = (F_1 - F_3) * V_{\Pi}$  – скорость паруса  $V_{\Pi}$  в четвёртой четверти при скорости паруса  $0,44 * V_B$  в первой и второй четвертях в связи с увеличением радиуса на  $1/4$  приблизительно будет равна  $0,5 * V_B$

$P = 0,17 * \rho * S * V_B^3$  – в четвёртой четверти коэффициент использования энергии ветра  $\zeta$  приблизительно равно 0,34. Среднее значение по всей окружности (по нашим расчётам с помощью ЭТ (приложение 2)) коэффициент использования энергии ветра  $\zeta$  приблизительно равен **0,381**.

Следовательно теоретическая мощность нашей ветроустановки:

$$P = 1/2 * \eta * 0,381 * \rho * S * V_B^3, \text{ где } \eta \text{ – коэффициент полезного действия}$$

Вывод: при использовании параметров, обеспечивающих максимальную мощность, коэффициент использования энергии ветра  $\zeta$  парусного ветрогенератора незначительно отличается от максимального для лопастных ветрогенераторов.

## 2.3 ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все эксперименты и измерения мы проводили на модели ветроустановки с одним парусом площадью  $1\text{ м}^2$ . Стоит сразу оговориться, что модель при скорости ветра около  $2\text{ м/с}$  начинала вращение в нужном направлении после остановки её в любой точке. Теоретически она должна немного вращаться в обратном направлении при остановке около точки  $270^\circ$ , но подумав около секунды, установка продолжила вращение в положительном направлении. В отличие от предыдущих наших моделей ход по окружности стал практически ровным, без рывков и изменений скорости вращения.

Измерения силы действующей на парус (*Приложение 1, фото 7*) мы проводили при различных углах поворота относительно ветра с интервалом в  $15$  градусов и скорости ветра  $2\text{ м/с}$ :

Величина угла в градусах	Величина силы теоретическая (н)	Величина силы практическая (н)
0 (360)	0,00 (2,19)	2
15	1,74	2
30	3,35	3,5
45	4,74	5
60	5,81	6
75	6,48	6,5
90	6,71	6,5
105	6,48	6,5
120	5,81	6
135	4,74	5
150	3,35	3
165	1,74	2
180	0,00 (2,51)	2,5
195	3,56	3,5
210	4,08	3,5
225	2,65	2,5
240	1,29	1,5
255	0,34	0,5
270	0,00	0
285	0,25	0
300	0,91	0,5
315	1,72	1,5
330	2,37	2,5
345	2,57	3

Как видно из таблицы практические значения силы в некоторых точках превышают теоретические. Мы это объясняем действием подъёмной силы (в некоторых моментах под действием силы ветра наш парус принимает форму крыла), которую не учитывали в теоретических расчётах.

1. Вычислили площадь паруса:  $S=1,03 \text{ м}^2$ .

2. Определили силу, и скорость ветра при которой ветроустановка с присоединенным генератором начала вращение: без установки парусов с помощью динамометра измерили силу  $F=3Н$ .

3. При разных скоростях ветра измеряли силу, частоту вращения, силу тока и напряжение на выводах генератора. Для этой цели собрали следующую электрическую цепь (Приложение 3 рис. 1). С помощью реостата изменяли сопротивление цепи. Для каждой скорости ветра определили частоту вращения ротора, при которой мощность нашей ветроустановки была наибольшей.

4. Получили наибольшую мощность - около 4 ватт при скорости паруса приблизительно равной 0,5 скорости ветра и скорости ветра 2 м/с и площади парусов  $2\text{м}^2$  (два паруса). Теоретически максимальное значение при скорости

ветра 2 м/с 7,86 - к.п.д.  $= \frac{P \text{ практическая}}{P \text{ теоритическая}} * 100\%$  приблизительно 50%.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения нашей работы мы получили следующие результаты:

1. Собрали компактный ветрогенератор из недорогих и доступных материалов с коэффициентом полезного действия около 50% и мощностью при скорости ветра 2м/с около 4 ватт.
2. Провели исследование его работы при разных скоростях ветра и скоростях паруса.
3. Вывели формулу расчёта мощности установки в зависимости от площади паруса, скорости ветра и скорости паруса.
4. Выяснили, что наша формула является частным случаем формулы Жуковского при оптимальных параметрах.

Возможное использование результатов работы:

1. Использование формулы при расчёте мощности установки: выбор площади паруса, подбор мощности генератора в зависимости от преобладающей скорости ветра в месте установки.
2. Изучение возможности использования энергии ветра в данной местности.
3. Расчётная мощность нашей установки при четырёх парусах площадью 1 м<sup>2</sup> (общая площадь парусов 4 м<sup>2</sup> при скорости ветра 5 м/с (преобладающая скорость ветра в нашей местности) равна 120 вт, что представляет возможность её практического использования например для получения электроэнергии в местах, где проведение линий электропередач является не рентабельным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фізіка: падруч. для 8-га кл. агульнаадукац. устаноў з беларускай мовай навучання/ Л.А. Ісачанкава, Ю.Д. Ляшчынскі; пад рэд. Л.А. Ісачанкавай; пер. з рус. мовы Н.Г. Ляўчук – Мінск: Нар. асвета, 2010. – 183с.: іл.
2. Фізіка: падруч для 7-га кл. агульнаадукац. устаноў з беларускай мовай навучання/ Л.А. Ісачанкава, Ю.Д. Ляшчынскі; пад рэд. Л.А. Ісачанкавай; пер. з рус. мовы Т.Р. Сяржант. – Мінск: Нар. асвета, 2009. – 181с.: іл.
3. Фізіка: вучэб. дапам. для 9-га кл. агульнаадукац. устаноў з беларускай мовай навучання/ Л.А. Ісачанкава, Г.У. Пальчык, А.А. Сакольскі; пад рэд. А.А. Сакольскага; пер. з рус. мовы Н.Г. Ляўчук – Мінск: Нар. асвета, 2010. – 213с.: іл.
4. Ветроэнергоресурсы и условия возведения ветроэнергетических установок на территории Восточной Прибалтийско-Черноморской зоны Европы / Лаврентьев Н.А., Волобуева Г.В., Гноевой А.И., Камлюк Г.Г., Евчук В.И.; под научной редакцией Н.А. Лаврентьева. – Минск: Право и экономика, 2010. – 455 с.
5. [http://www.rosinmn.ru/vetro/teorija\\_parusa/teorija\\_parusa.htm](http://www.rosinmn.ru/vetro/teorija_parusa/teorija_parusa.htm)

## Приложение 1



Фото 1. Ветроустановка с осью паруса в горизонтальной плоскости  
(Электрогенератор – двигатель постоянного тока)



Фото 2. Ветроустановка с вертикальной осью паруса  
(Площадь паруса 0,25 м<sup>2</sup>)



Фото 3. Ветроустановка с вертикальной осью паруса  
(Площадь паруса  $0,33 \text{ м}^2$ )

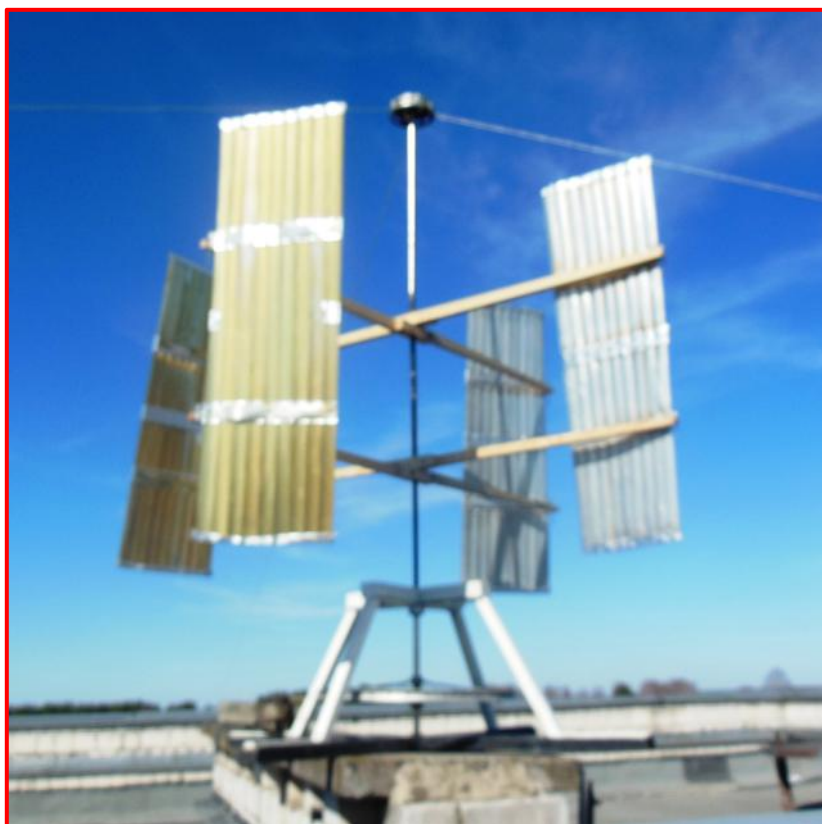


Фото 4. Ветроустановка с вертикальной осью паруса  
(Четыре паруса по  $0,33 \text{ м}^2$ )



Фото 5. Ветроустановка с вертикальной осью паруса и генераторы  
(Четыре паруса с профилем крыла)



Фото 6. Измерение скорости ветра

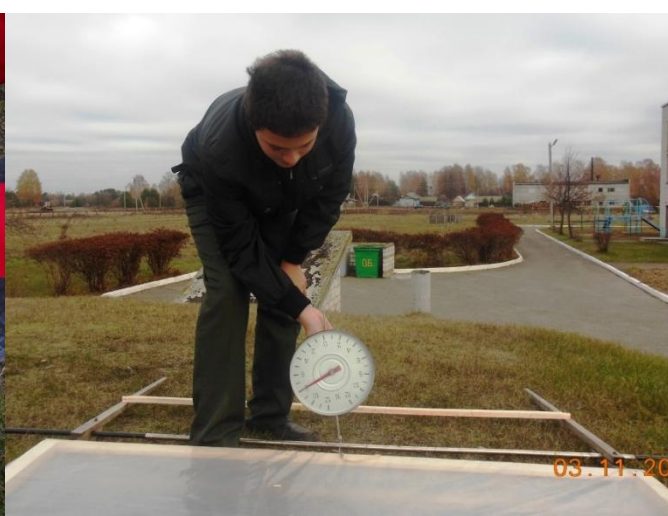


Фото 7. Измерение силы

Приложение 3

