

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И МОЛОДЁЖИ  
РЕСПУБЛИКИ КРЫМ  
Государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного  
образования Республики Крым «Малая академия наук «Искатель»

**Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей среды  
им. Б. В. Всесвятского**

**Номинация: «Зелёная инженерия»**

**ИЗУЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОМАСШТАБНОГО  
ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА В ГОРОДСКИХ  
УСЛОВИЯХ**

Работу выполнил:

**Сорокин Дмитрий Игоревич**,  
учащийся 11 класса Муниципального  
бюджетного общеобразовательного  
учреждения «Школа –гимназия № 39  
им. Я.Г. Крейзера» муниципального  
образования городской округ  
Симферополь Республики Крым,  
обучающаяся объединения «Решение  
задач по физике» ГБОУ ДО РК «МАН  
«Искатель»

Научный руководитель:

**Бурко Виктория Ивановна**,  
педагог дополнительного образования  
Государственного бюджетного  
образовательного учреждения  
дополнительного образования  
Республики Крым «Малая академия  
наук «Искатель»

ОГЛАВЛЕНИЕ	
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	5
РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	5
1.1. Обоснование преимуществ вертикального типа ВГВТ перед горизонтальным. .....	5
1.2. Выбор профиля ротора Савониуса. ....	6
2.2. Моделирование прототипов в САПР “КОМПАС” .....	7
2.2.1. Моделирование ротора. ....	7
2.2.2. Проектирование и моделирование электрогенератора. ....	7
2.3. Изготовление прототипа.....	8
2.4 Испытания прототипа .....	8
2.5 Сравнение с существующими решениями .....	9
2.6 Экономическое обоснование.....	9
ВЫВОД.....	10
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	12

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВГВТ – Ветрогенераторы вертикального типа

ВГГТ – Ветрогенераторы горизонтального типа

ПО - Программное Обеспечение

САПР – Система Автоматизированного Проектирования

ВГМТ – Ветрогенераторы малого типа

## ВВЕДЕНИЕ

Покорение воздушных потоков, вероятно, одно из величайших достижений человечества за всю его историю. От ветряных мельниц, помогающих прокармливать население, до парусных судов, бороздящих неизведанные просторы планеты. В ходе индустриальной революции многую работу вместо ветра начали выполнять паровые машины, а потом и двигатели внутреннего сгорания. Но сейчас, из-за озабоченности мирового сообщества глобальным потеплением, ветряные технологии снова набирают популярность в виде крупных ветряков, расположенных в ветряных парках, для добычи электроэнергии. Но несмотря на это, в крупных городах почти не встречаются локальные решения для генерации электричества.

Цель работы – дать оценку целесообразности использования маломасштабных ВГВТ в городских условиях.

Задачи:

1. Изучить мировую литературу на тему ветрогенераторов.
2. Изучить Интернет-ресурсы.
3. Разработать 3-Д модель совместимого с городом ветрогенератора вертикального типа и метод его изготовления.
4. Изготовить, собрать и протестировать прототип.
5. Сравнить эффективность созданного прототипа с готовыми решениями.
6. Дать оценку рациональности использованию маломасштабных ВГВТ в городских условиях.
7. Сделать выводы.

Методы исследования: изучение литературы, моделирование, эксперимент, анализ, сравнение.

Предмет исследования: маломасштабные ВГВТ.

Объект исследования: использование маломасштабных ВГВТ в городских условиях.

Актуальность: Ветрогенераторы вертикального типа являются относительно новым изобретением, и с каждым годом становятся всё более и более популярным решением. Работа затрагивает малоизученную область применения маломасштабных ветрогенераторов в стесненных условиях городской среды.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 1.1. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ВГВТ ПЕРЕД ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ.

На данный момент выделяют 2 основных типа ветрогенераторов. Это генераторы горизонтального (рис. 1.1.1) и вертикального типа (рис. 1.1.2).

Первый тип чаще всего применяется в крупных электростанциях на открытых поверхностях либо рядом с берегом, где большой размах лопастей не имеет значения. Вертикальные же генераторы используются гораздо реже, ввиду своей необычной формы и более низкой эффективности.

На рис. 1.1.3 можно увидеть примерный график отношения коэффициента скорости к коэффициенту мощности для различных моделей ветрогенераторов.

Как можно увидеть, коэффициент мощности не превышает примерно 0.6. Это определяется законом Беца, который гласит, что ветрогенератор может забрать не более 59,3 % мощности падающего на него воздушного потока.

Различные дизайны ветрогенераторов стремятся получить максимальный коэффициент мощности при определённом коэффициенте скорости. Коэффициент скорости ветрогенератора – отношение угловой скорости вращения кончиков лопастей к скорости ветра. Городская местность создаёт существенные ограничения при установке ветрогенераторов. Ограниченное придомовое пространство оставляет генераторы вертикального типа как единственный выбор, ведь они занимают гораздо меньше площади и могут принимать воздушный поток с любого направления, компенсируя этим меньшую эффективность при высоких скоростях. Маломасштабные ветрогенераторы вертикального типа могут использоваться для обеспечения питанием автономных систем круглосуточного наблюдения в труднодоступных местах, а также как способ зарядки мобильных устройств в экстренном случае.

Существуют 2 основных вида ВГВТ: Ротор Савониуса (рис. 1.1.2) и Ротор Дарье (рис. 1.1.4). Ротор Савониуса был придуман в 1926 году финским архитектором и изобретателем Сигурдом Савониусом и описан им в труде “Ветряной ротор в теории и практике” [2]. Он генерирует вращательное движение за счёт двух “ковшей”, расположенных вокруг оси вращения. Из-за полукруглой формы ковшей у них с одной стороны аэродинамическое сопротивление больше чем на другой. Из-за этого дисбаланса ветер сильнее действует на одну половину ротора, приводя его в вращение (рис. 1.1.5.). Ротор, как видно на рис. 1.1.3 имеет наилучшую производительность при низких скоростях ветра, но теряет мощность при высших скоростях.

Ротор Дарье был запатентован чуть позже, и в его основе лежит другой принцип. Вместо того чтобы использовать полукруглые лопасти, ротор Дарье крутится за счёт создания тяги на “крыльях” турбины (рис. 1.1.6). Он более эффективен чем ротор Савониуса на высоких скоростях ветра, но не обладает свойством самозапуска, который позволяет первому работать при слабом ветре. Самозапуск – возможность ветрогенератора приводить себя в движение только от

ветра, без помощи стартеров, как у больших горизонтальных трёхлопастных ветрогенераторов.

Существуют также и гибриды двух типов (рис. 1.1.7), которые состоят из ротора Савониуса посередине, а по краям - крылья ротора Дарье. В зависимости от диаметров лопастей Савониуса и крыльев Дарье у гибрида разная производительность при разных скоростях ветра [2]. Но работа данных гибридов малоизучена, и они занимают больше места, чем отдельные варианты. В связи с этим я решил, что к условиям несильного и непостоянного ветра в плотной застройке городской среды лучше всего будет подходить ротор Савониуса из-за возможности самозапуска и простоты в изготовлении.

## 1.2. ВЫБОР ПРОФИЛЯ РОТОРА САВОНИУСА.

Существует множество разновидностей с разными профилями и формами ковшей. Для того чтобы понять, какой тип использовать, мы изучили широкий спектр научных работ со всех уголков мира.

Сперва я решил определиться с количеством лопастей. Исходя из ранее упомянутого труда Сигурда Савониуса [1], чем больше лопастей – тем меньше крутящий момент, а соответственно, и мощность турбины. Далее необходимо выбрать профиль лопастей. Из-за огромного количества возможных профилей не существует единой формулы для измерения эффективности профиля лопастей до их изготовления. Единственный выход – проводить опыты в реальной жизни либо в специализированном ПО.

В исследовании [3] тестируются произвольные профили лопастей. В ходе исследования было обнаружено, что ротор у которого лопасти скругляются ближе к краю и ровняются к центру оказывается самым эффективным из протестированных (рис 1.2.1). Этот профиль крайне похож на ротор Баха (рис.1.2.2), имеющий подобную форму крыла. В исследованиях [4][5] от студентов Университета Упсалы в Швеции детально изучены 3 различных профиля ротора Савониуса: классический, тип Бенеша и модифицированный тип Баха (рис.1.2.3). Все они различаются степенью и расстоянием скругления лопасти.

В ходе двумерных симуляций в САПР ANSYS выявлено, что наибольший коэффициент мощности имеет профиль типа модифицированного Баха, что совпадает с прошлым упомянутым исследованием. В том же САПР были проверены различные профили модифицированного типа Баха с разными углами круглого сегмента и межлопастным расстоянием.

Самым эффективным оказался профиль с углом сегмента 110 градусов, расстоянием между лопастями 31 мм и коэффициентом перекрытия 0.25.

Коэффициент перекрытия – результат деления расстояния перекрытия на радиус сегмента.

Важно заметить, что данные размеры были получены при общем радиусе ротора чуть больше 50 см. Поэтому, производительность уменьшенного ротора будет в разы меньше.

## РАЗДЕЛ 2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Выбор материалов.

Мы решили изготовить ротор с помощью аддитивных технологий на 3Д принтере. Для простоты изготовления и структуральной прочности турбины было решено не делать лопасти турбины больше области печати принтера (в нашем случае Flying Bear Ghost 6 с 255\*210\*200 мм). В качестве филамента был использован PLA, ввиду простоты и скорости его печати, что полезно при быстром проектировании множества вариантов одной и той же детали. Температура стеклования PLA (полилактида) – около 55-60 градусов [7], что гораздо больше температуры воздуха. Чтобы сократить возможность перегрева ротора было принято решение не использовать в конструкции тёмные цвета, которые хуже отражают тепло.

### 2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ В САПР “КОМПАС”.

#### 2.2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТОРА.

Для создания 3-Д моделей роторов был использован САПР “Компас” от компании АСКОН.

Сперва сделал эскиз выбранного профиля (рис.2.2.1.1). Нарисованный эскиз я уменьшил до размеров, при которых я мог бы изготовить на 3-Д принтере (в 3.5 раза). После этого мне надо было определиться с планируемой высотой ротора. Для этого мы обратились к исследованию Кристофа Собчака [6], где в ходе симуляций в САПР ANSYS было выявлено следующее. Функция

$$C(p) = F(AR),$$

где  $AR$  – отношение высоты ротора к его ширине (размаху крыльев),

$C(p)$  – коэффициент мощности является натуральным логарифмом (рис 2.2.1.2).

Это означает, что нельзя бесконечно увеличивать высоту ротора чтобы получать более высокие значения, так как есть предел.

Исходя из полученных мной данных, было решено, что для полноразмерной модели я буду использовать отношение  $AR = 1.5$ .

Теперь созданному эскизу лопасти я задал толщину (рис.2.2.1.3), и задумался как соединить их. Мы придумали схему крепления лопастей, в которой они вставляются в пазы на верхнем и нижнем основаниях ротора, удерживая их вместе. С помощью булевой операции я вычел лопасти из круглых оснований, получив идеальные вырезы под лопасти.

#### 2.2.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА.

После того, как 3-Д модель ротора Савониуса была готова (рис.2.2.2.1), передо нами встала задача найти способ, с помощью которого превращать вращательное движение ротора в электричество. Для этого мы решил использовать обычный моторчик постоянного тока (в моём случае F280-10440 12V). Одним из самых главных недостатков такого решения является то, что он, как и большинство небольших моторчиков постоянного тока не рассчитаны для применения в низкооборотных ветрогенераторах. Обычно в ВГГТ используются аксиальные (плоские) генераторы (рис.2.2.2.2), позволяющие получить высокое

напряжение при низких оборотах. Чтобы добиться большего напряжения я решил использовать повышающую передачу. Её прототип мы собрали из конструктора LEGO, используя балки и штифты. На 3-Д принтере распечатали крепление, позволяющее легко крепить её к мотору. Конструкция позволила мне легко менять шестерёнки и получать любое передаточное число. После этого я смоделировал крепление на мотор (рис. 2.2.2.3) и адаптер для передачи. Теперь мы были готовы к изготовлению модели.

### 2.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПА

Для того чтобы изготовить детали я воспользовался слайсером (программой для перевода 3-Д моделей в набор инструкций для ЧПУ устройства) Ultimaker Cura. Детали печатались отдельно, чтобы в случае неполадки пришлось переделывать только одну. В сумме на печать при высоте слоя 0.2 мм понадобилось столько времени (табл. 3.1) Печать производилась на принтере Flying Bear Ghost 6 с скоростью 60 мм/с и обдувом 50% (рис 2.3.1)

После печати детали не нуждались в дополнительной обработке, так как мы специально их спроектировали с минимальным количеством нависающих над столом принтера частей (Для которых могут потребоваться дополнительные поддержки при печати, на которые тратится время и материалы).

После печати мы склеили детали цианоакрилатным клеем и вставил мотор в держатель. В качестве стойки для испытаний я использовал модульную систему хранения TOOLBOARD [9], ввиду простоты изменения и добавления креплений. К мотору я припаял стандартный светодиод, рассчитанный на 2.1 В максимум как нагрузку.

### 2.4 ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА

Так как на момент написания работы у меня в районе был штиль, мы решили смоделировать желаемые погодные условия (ветер) с помощью фена. С помощью 2х режимов: медленного ( $\approx 10$  м/с) и быстрого ( $\approx 20$  м/с ) мы смогли определить способность ротора к самостарту при разных скоростях ветра с разными вариациями шестерёнок на моей тестовой установке (рис 2.4.1). После активного обдувания прототипа с помощью фена с разными режимами чередуя различные вариации шестерёнок у нас получились такие результаты: (Таблица 3.2) (Измерения выходных показаний проводились мультиметром)

Мы заметили, (Таблица 3.2), что при использовании повышающей передачи из-за увеличенного сопротивления ротор с трудом начинал движение, и при колебании слабого ветра мог вообще не начинать движение. Эта проблема отсутствовала при использовании передачи 1:1. В современных ветрогенераторах для стабилизации вращения на любой скорости верта существуют системы контроля скорости – коробки передач, тормоза и системы контроля угла лопастей (рис 2.4.2). Также светодиод полностью загорается только при продолжительном воздействии сильного ветра. Это означает, что последующие прототипы скорее всего будут нуждаться в серьёзной переработке электрогенератора, либо в увеличении лопастей ротора.

## 2.5 СРАВНЕНИЕ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ РЕШЕНИЯМИ

В интернете в ценовом сегменте до 1000 рублей я смог найти только один ВГВТ [8]. По заявлениям продавца, генератор может производить до 5 вольт и питать аналогичный моему светодиод. Неизвестно точно при каких обстоятельствах были получены эти показатели. Поэтому, мы предположили, что ниша маломощных ВГВТ ещё не занята, либо не имеет качественных продуктов. С точки зрения экологичности маломощные ВГВТ также имеют преимущество перед тонкими маломощными солнечными панелями, так как детали ротора и электрогенератора перерабатываемы и биоразлагаемы, в отличие от солнечных панелей, содержащих опасные загрязнители. [10]

## 2.6 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для того чтобы обосновать экономически свой проект мне необходимо было составить таблицу стоимости компонентов ветрогенератора. (Таблица 3.3).

Несмотря на полное отсутствие аналогов моему прототипу в открытом доступе, я постарался найти приближённые, и сравнить их по основным критериям, таким как: стоимость, экологичность и другие (Таблица 3.4). Анализ характеристик ближайших аналогов подтвердил, что в сфере маломасштабных ВГВТ нет качественных решений. А прототип автора, с некоторыми доработками, способен занять эту нишу. Используя более совершенные производственные процессы и закупая детали оптом можно будет снизить цену производства готовых ВГВТ, ведь наш прототип изготавливался в единственном экземпляре, без учёта прибыли с возможной продажи.

## ВЫВОД

ВГВТ малого масштаба – малоизученная но перспективная сфера. Они могут использоваться для питания систем освещения либо наблюдения в труднодоступных местах. Изготовленный нами прототип уникален, так как впервые использует передовые мировые достижения в исследовании ВГВТ для оптимизации формы лопасти компактных ветрогенераторов.

В ходе проделанной работы:

1. Самостоятельно изучил несколько научных статей и интернет ресурсов, в том числе на английском языке в оригинале, перевёл на русский несколько иллюстраций;

2. Разработали на основе изученного материала прототип маломасштабного ВГВТ для городских условий, изготовил и протестировал его;

3. Сравнили изготовленный прототип с найденными мною существующими решениями маломасштабных ВГВТ в интернете, определил его уникальность.

4. Определили, что ВГВТ в городах имеет шанс на конкуренцию с фотоэлектрическими решениями, имея свои плюсы.

5. Улучшил свои навыки прототипирования и 3-Д моделирования в САПР “Компас”;

Имитируя условия эксплуатации маломасштабных ВГВТ мы убедились, что их использование может быть рационально.

Из возможных векторов будущего развития можно выделить:

1. Разработку системы контроля скорости и сопротивления генератора;

2. Изучение производительности компактных гибридов ротора Савониуса и Дарье;

3. Оптимизацию производства частей ротора;

4. Создание конкурентноспособного бизнес-продукта на основе изготовленного прототипа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. "Effects of internal rotor parameters on the performance of a two bladed Darrieus-two bladed Savonius hybrid wind turbine", Mohammad Asadi, Rahim Hassanzadeh, Energy Conversion and Management, Volume 238, 2021
2. "Release of metal pollutants from corroded and degraded thin-film solar panels extracted by acids and buried in soils", L.C. Su, H.D. Ruan, D.J. Ballantine, C.H. Lee, Z.W. Cai Applied Geochemistry, Volume 108, 2019
3. "Blade Shape Optimization of Savonius Wind Turbine at Low Wind Energy by Artificial Neural network", Sarah Ali Al-Shammari and Abdul Hassan Karamallah and Sattar Aljabair, 2020
4. "Design Optimization of Savonius Wind Turbine using CFD Simulations", V. Manavar, Dissertation, 2023
5. "Numerical investigations of an influence of the aspect ratio on the Savonius rotor performance" Krzysztof Sobczak J. Phys.: Conf. Ser. 1101 012034 2018
6. "Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition", Anders Södergård, Mikael Stolt, Progress in Polymer Science, Volume 27, Issue 6, 2002, Pages 1123-1163
7. "Two-dimensional Study of Blade Profiles for a Savonius Wind Turbine", Sundberg, M. Lundberg, J. Solhed, and A. Manousidou, Dissertation, 2020
8. <https://aliexpress.ru/>
9. The Wing-rotor in Theory and Practice", S.J. Savonius 1926
10. Онлайн магазин фирмы TOOLBOARD <https://tb59.ru/>

## ПРИЛОЖЕНИЯ



Рис.1.1.1. Ветрогенератор горизонтального типа.



Рис.1.1.2. Ветрогенератор вертикального типа.

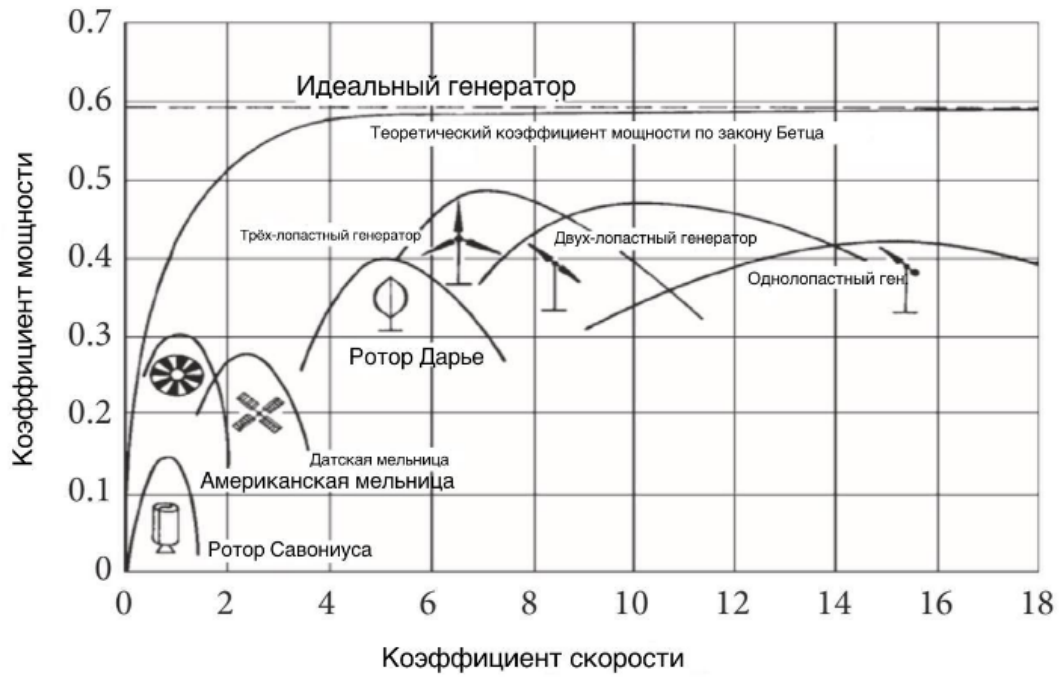


Рис.1.1.3. Примерный график отношения коэффициента скорости к коэффициенту мощности для различных моделей ветрогенераторов.



Рис. 1.1.4. Ротор Дарье.

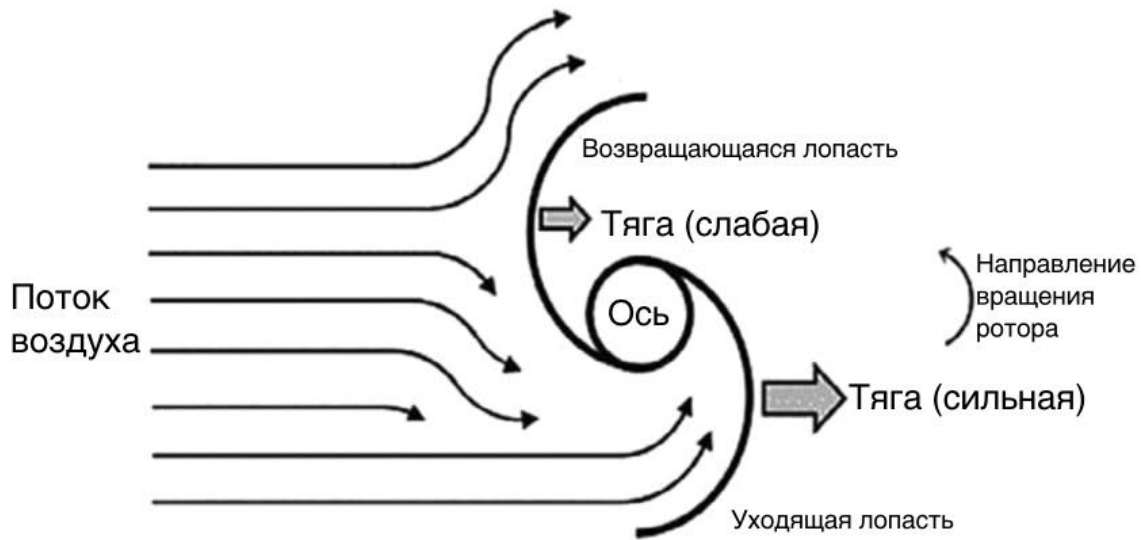


Рис.1.1.5. Принцип работы ротора Савониуса.

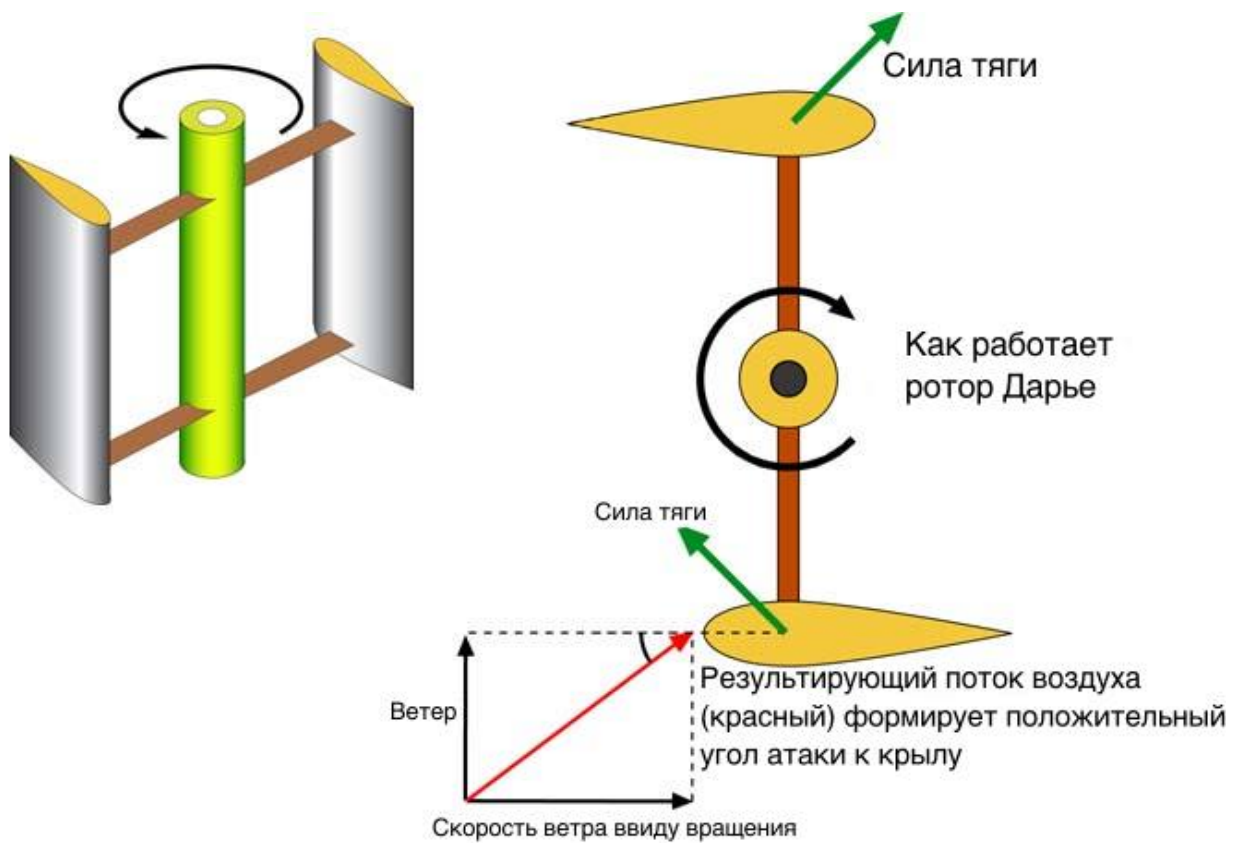


Рис.1.1.6. Принцип работы ротора Дарье.



Рис.1.1.7. Гибрид роторов Дарье и Савониуса.

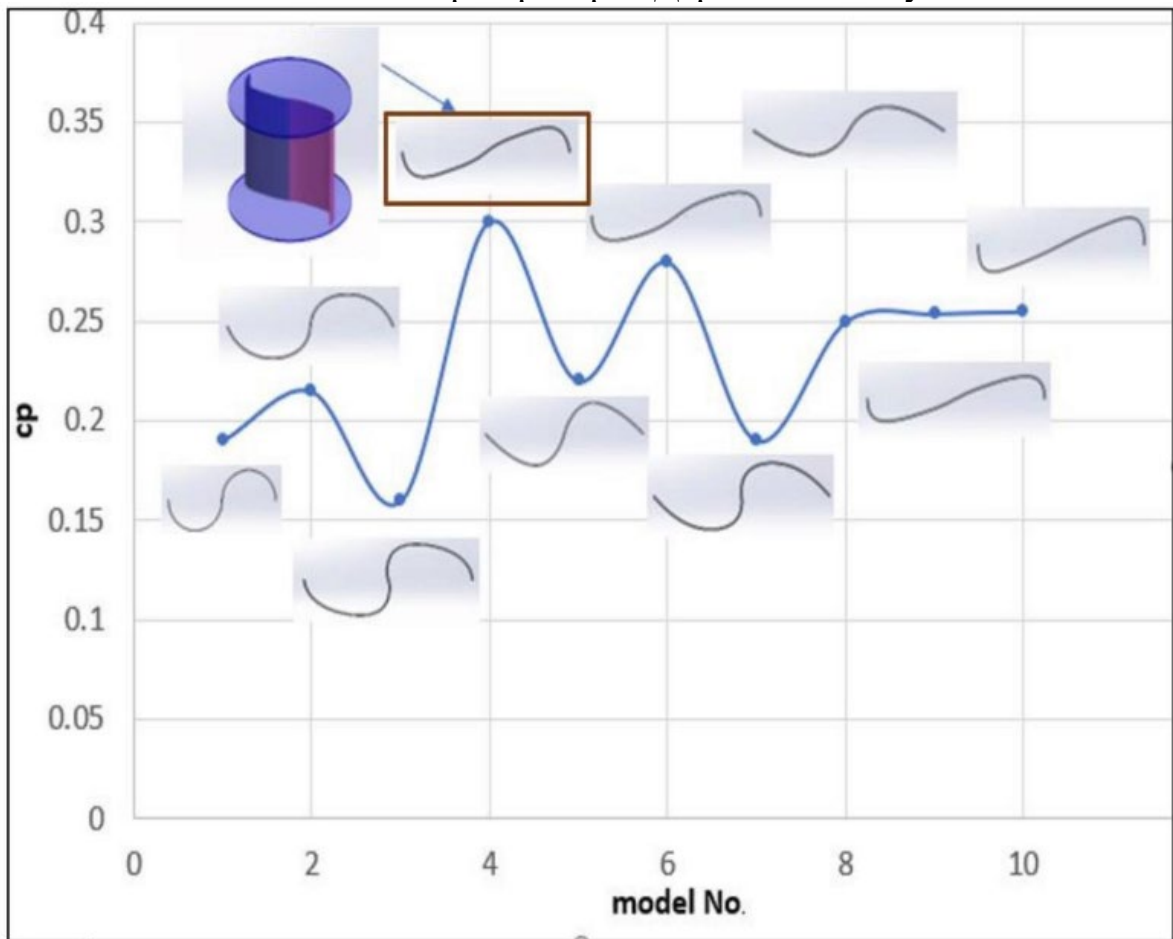


Рис 1.2.1. Таблица результатов из исследования [3]



Рис.1.2.2. Ротор Баха.

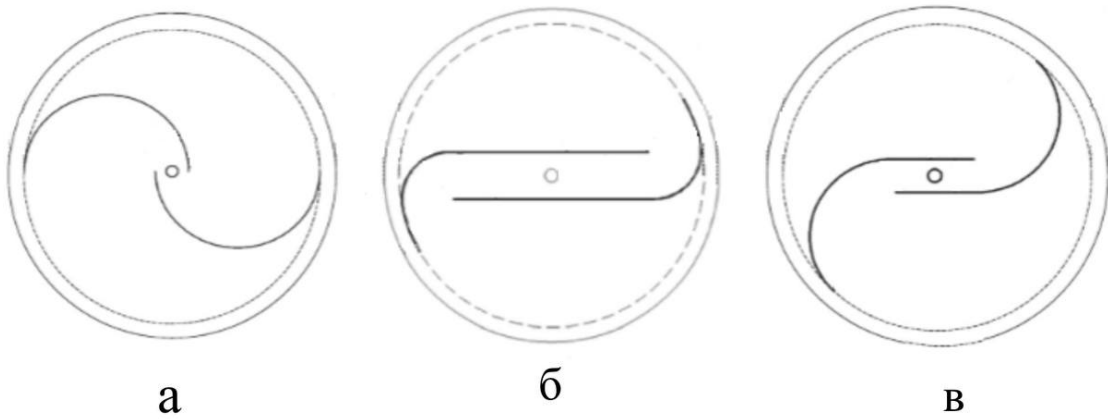


Рис.1.2.3. Профили ротора Савониуса: а – классический, б – тип Бешена, в – модифицированный типа Баха.

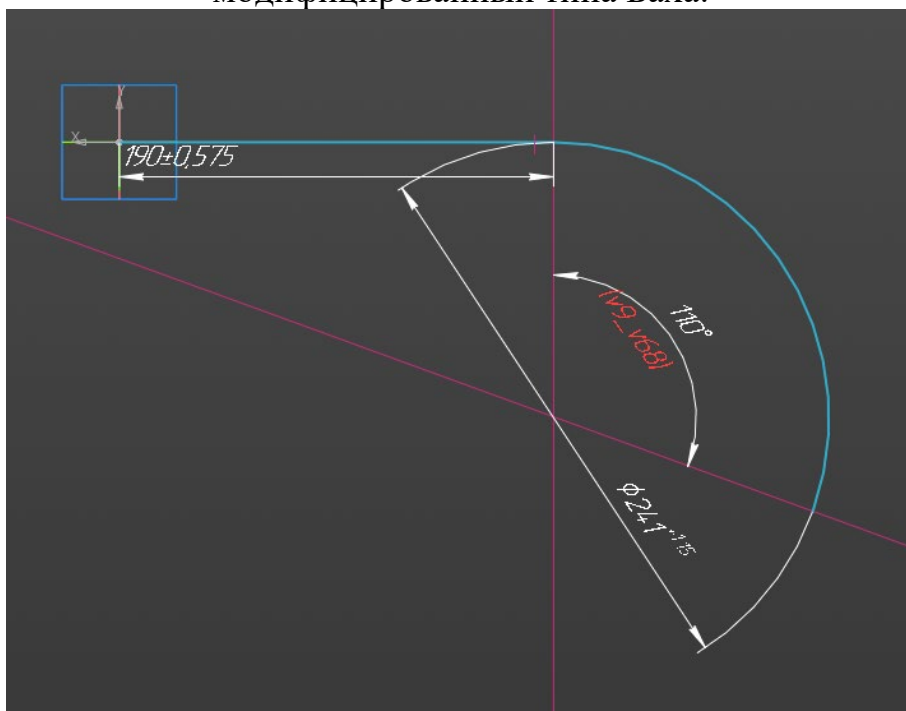


Рис. 2.2.1.1. Эскиз профиля в САПР «Компас 3D»

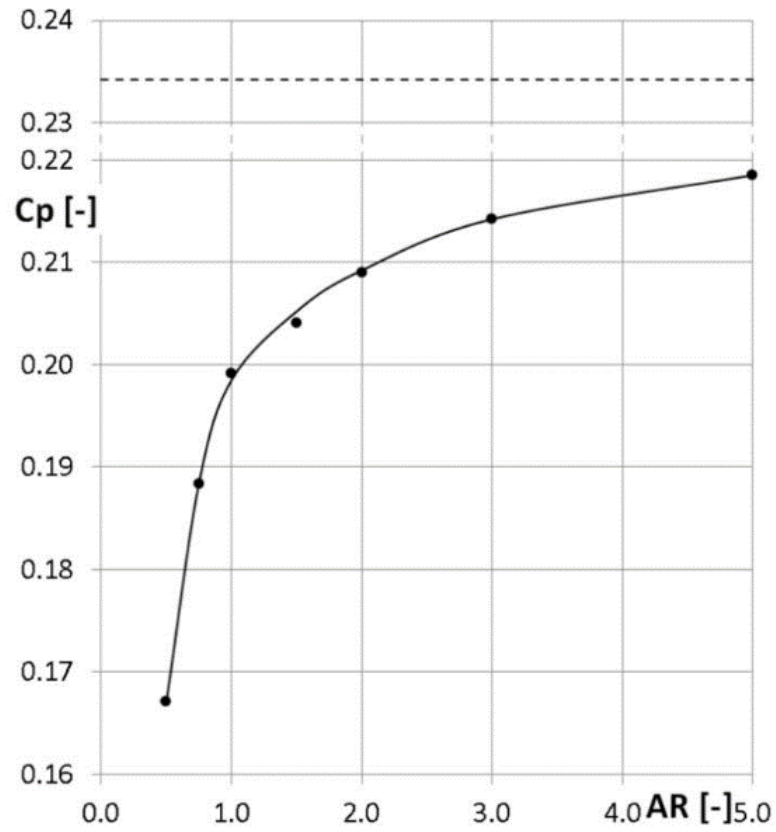


Рис.2.2.1.2. Зависимость коэффициента мощности от отношения высоты ротора к его ширине.

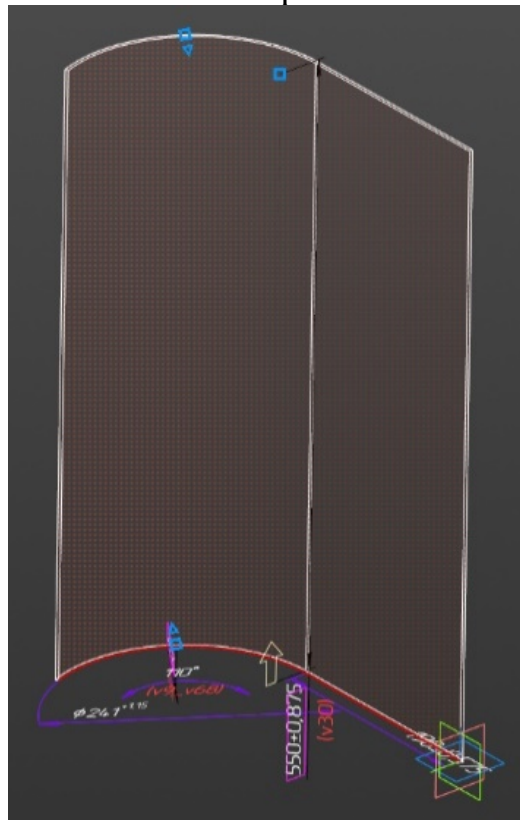


Рис.2.2.1.3. Эскиз лопасти.

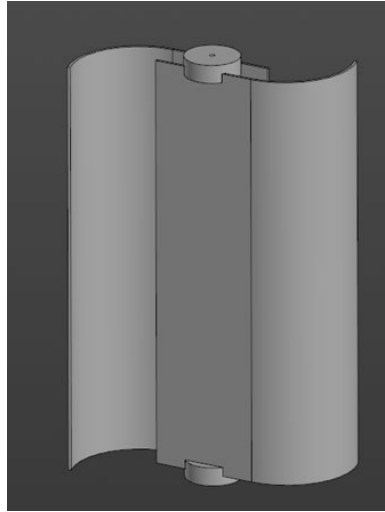


Рис.2.2.2.1. Вид модели ротора Савониуса сборки.



Рис.2.2.2.2. Аксиальный генератор.

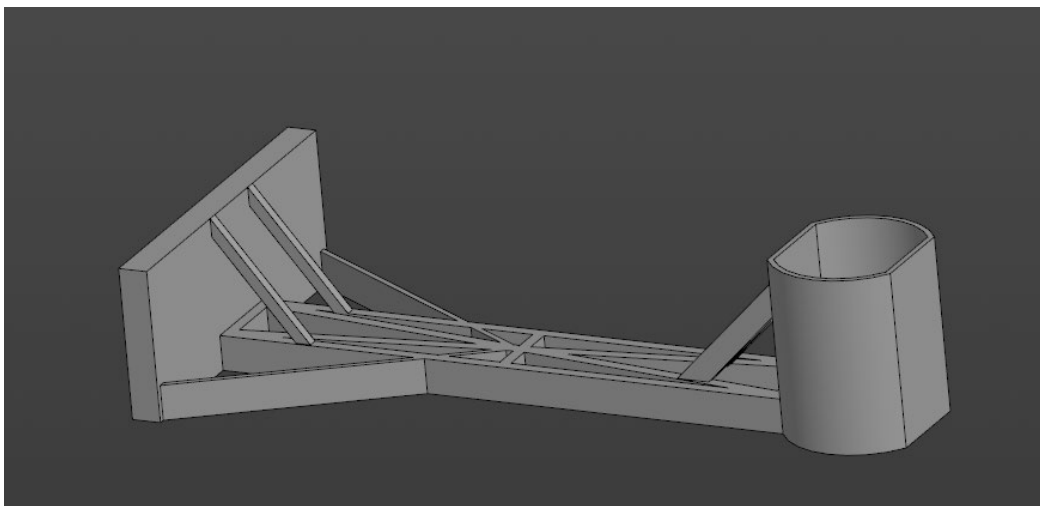


Рис 2.2.2.3 Крепление под мотор

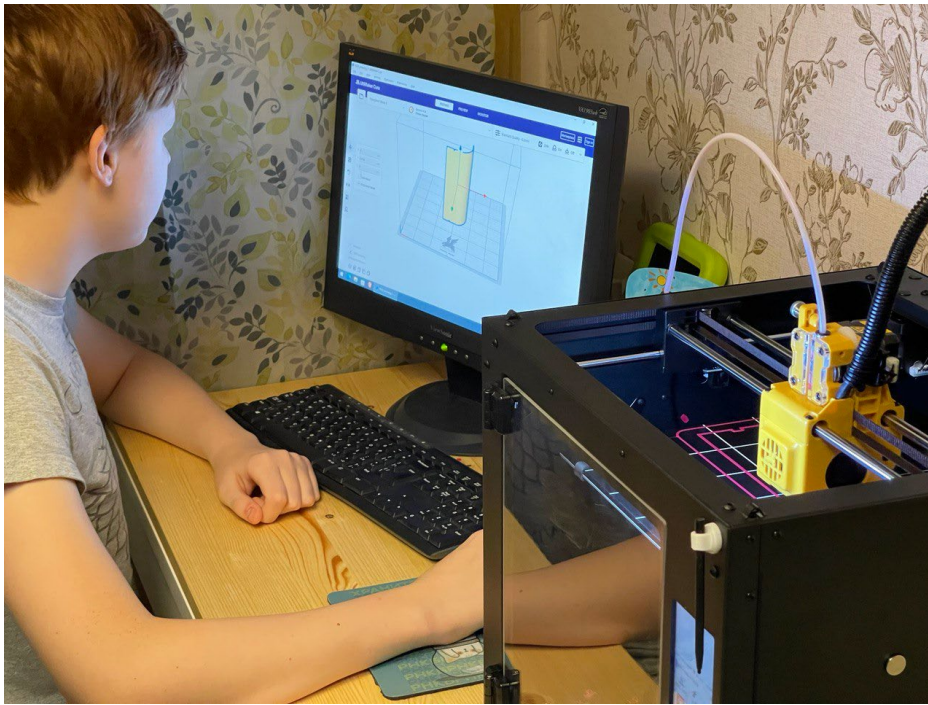


Рис 2.3.1 3-Д принтер (справа) в процессе печати одной из лопастей



Рис 2.4.1 Прототип маломасштабного ВГВТ (с передачей 16:1). Светодиод сверху.

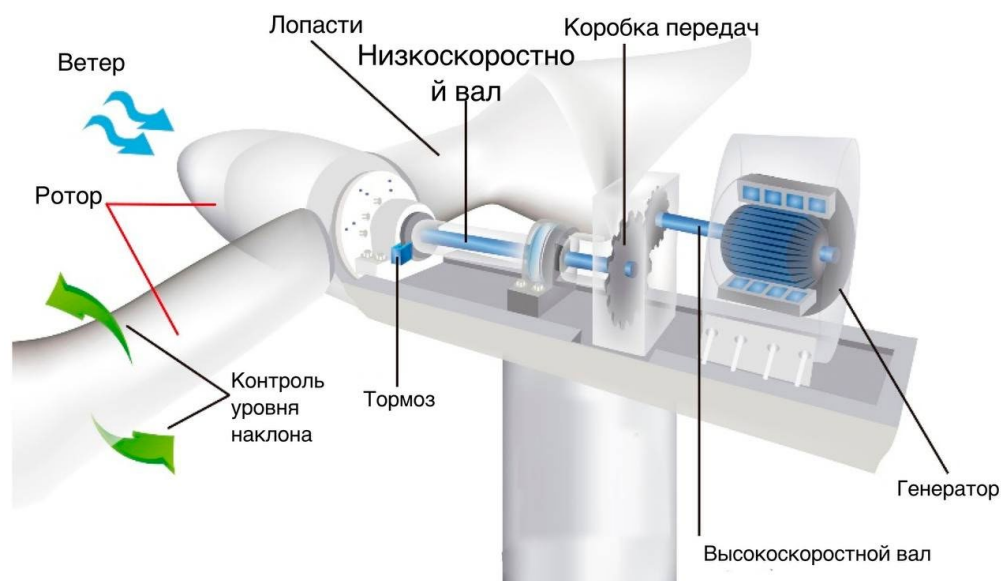


Рис 2.4.2 Система контроля современного ВГГТ

Таблица 3.1

Время печати деталей (погрешность 5 минут из-за времени нагрева сопла)

Деталь	Время печати
Лопать (2 шт)	530 минут
Держатель лопасти (3 шт)	70 минут
Держатель мотора	110 минут
Верхний держатель ротора	90 минут
Держатель для передачи	15 минут
Переходник на шестерёнку	20 минут

Таблица 3.2

Результаты тестирования прототипа ВГВТ

Вариация передачи и режим фена	При включении фена	После 10 секунд
1:1 Слабый	0.2 V, Легко начинает крутиться, светодиод не светится	0.4 V, Быстро крутится, светодиод не светится
1:1 Сильный	0.4 V, Легко начинает крутится, светодиод не светится	0.5 V, Быстро крутится, светодиод не светится
16:1 Слабый	0.3 V, С трудом разгоняется, светодиод не светится	0.9 V, Умеренно крутится, светодиод тускло светится
16:1 Сильный	0.6 V, светодиод не светится	1.2 V, Быстро крутится, светодиод светится.

Таблица 3.3

## Стоимость деталей

Деталь	Стоимость
Лопасть (2 шт)	70 рублей
Держатель лопасти (3 шт)	34 рубля
Держатель мотора	20 рублей
Верхний держатель ротора	18 рублей
Держатель для передачи	5 рублей
Переходник на шестерёнку	10 рублей
Мотор F310	300 рублей
<b>ВСЕГО</b>	<b>457 рублей</b>

Таблица 3.4

## Сравнение прототипа с аналогами

Вариант	Портативный ветрогенератор от LILIDONGHUA88 [8]	Вертикальный ветрогенератор от Hilitand [8]	Прототип автора
Цена	440 руб	500 руб	457 руб
Тип	ВГГТ	ВГВТ	ВГВТ
Мощность*	0.1 Вт	0.5 Вт	0.5 Вт
Размах лопастей	9 см	10 см	16 см
Материал	Пластик**	Пластик**	PLA
Наличие крепления	Нет	Нет	Да
Наличие регулятора напряжения	Да	Нет	Нет
Уточнения	*Мощность по оценкам автора и продавца **Неизвестный тип пластика, вероятнее всего не биоразлагаемый		