

УДК 621.3:621.22:620.91

КАТАМАРАН КАК ПАРУСНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА: УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

^{1,2}Чекарев Константин Владимирович ^[0000-0002-5140-5142]^{1,3}Залиханов Алим Михайлович ^[0000-0002-2540-6045]¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия²E-mail: kostya-chekarev@yandex.ru³E-mail: bulungu@yandex.ru

Аннотация. Установки, преобразующие кинетическую энергию ветра в электрическую энергию, в том числе плавающие ветровые установки, из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры. Предложен вариант парусной энергетической установки, преобразующей энергию ветрового потока в энергию водного потока, которая, в свою очередь, используется для производства электроэнергии. Созданный макет парусной энергетической установки, выполнен в виде катамарана, симметричного относительно носа и кормы, который совершает циклические движения по дуге окружности в заданном относительно направления ветра угловом интервале. Проведены лабораторные исследования, которые показали принципиальную возможность создания и эксплуатации подобной установки. Для достижения оптимальных динамических характеристик созданы несколько конструкций катамарана и которыми проведены экспериментальные исследования. Полученные результаты представлены в данной статье.

Ключевые слова: ветроэнергетика, гидроэнергетика, морские электростанции, парусное судно, парусная энергетическая установка

1 Введение

Ветроэнергетика - одна из самых быстро развивающихся отраслей возобновляемой энергетики. По оценкам IRENA [1], в 2020 году общая мощность оншорных ветроэлектростанций (ВЭС) в мире выросла с 594 до 699 ГВт, офшорных - с 28 до 34 ГВт. Одной из причин, ограничивающей рост мощности офшорных станций, является их высокая стоимость, которая определяется, в том числе, глубиной моря в месте расположения. В целом, согласно [2], капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности в 2019 году составили \$ 1473 для оншорных и \$3800 для офшорных станций, выровненная стоимость выработки электроэнергии (LCOE) – соответственно, \$0,053 и \$0,115/кВтч.

В качестве альтернативы разрабатываются плавающие ветровые установки, в частности, в 2017 году у побережья Шотландии была запущена экспериментальная плавучая ветроустановка в рамках совместного норвежско-шотландского проекта [3]. В настоящее время у берегов Португалии осуществляется строительство плавучей ветроэлектростанции, состоящей из трех турбин суммарной мощностью 25МВт, одна из которых мощностью 8 МВт была запущена в 2019 году [4].

Нами был предложен вариант установки, позволяющей уменьшить размер преобразователя энергии плавучей энергетической установки [5]. Решить данную задачу помогает факт нахождения плавучей установки в двух средах - воздушной и водной, плотность которой примерно в тысячу раз больше воздушной. Если кинетическую энергию воздушного потока преобразовать в кинетическую энергию водного потока, то размеры преобразователя этой энергии можно существенно уменьшить. Такое преобразование можно осуществить с помощью парусной энергетической установки. Предложенный вариант установки содержит парусный катамаран, к днищу которого прикреплен гидрогенератор, выполненный в виде винта и электрогенератора. При движении катамарана возникает обтекающий его корпус водный поток, который вращает винт и соединенный с ним электрогенератор. Для передачи вырабатываемой энергии потребителю используется электрический кабель.

Автоматическое управление парусной энергоустановкой следует сделать максимально простым и обеспечивающим надежность ее работы. Было высказано предположение, что такое управление можно реализовать, если траекторию движения катамарана организовать так, чтобы он совершал циклические движения по дуге окружности в заданном угловом интервале с точками поворота, расположенными симметрично относительно направления ветра. В этом случае управление его движением сводилось бы к автоматическому определению точек на траектории для изменения направления движения катамарана и автоматическому изменению положения парусов. Сам катамаран должен быть механически связан с с бумом, закрепленным на морском дне, что позволяет ему двигаться по траектории, которая может быть представлена в виде основания равностороннего треугольника. Однако для такого движения катамаран должен иметь специальную конструкцию, а именно, он должен быть симметричным относительно носа

и кормы. Для проверки возможности реализации предлагаемой конструкции была создана экспериментальная установка, на которой были проведены исследования [6].

2 Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальная установка включала экспериментальный бассейн, в котором проводились исследования, генератор ветрового потока и четыре варианта макета парусной энергетической установки разного веса, с разным количеством мачт и разной площадью парусов.

Макеты парусной энергетической установки были выполнены в виде симметричных относительно носа и кормы катамаранов. Корпуса катамаранов первого и второго варианта выполнены из пластикового короба прямоугольного сечения со сторонами 2,5 см и 4 см. Длина корпусов катамаранов без конусов на его концах составляла 300 мм, ширина 14,5 см. На катамаране 1 было установлено две мачты, а на катамаране 2 три мачты. К каждой из мачт был прикреплен косою парус площадью 215 кв. см., сделанный из лавсановой пленки с металлическим покрытием. Площадь парусов катамаранов 1 и 2 составляла, соответственно, 430 см² и 645 см², а их вес был равен 420 грамм.

Корпуса катамаранов третьего и четвертого варианта были выполнены из легкой пластиковой трубки диаметром 3,6 см. Длина его корпусов без конусов на его концах составляла 32 см, расстояние между центрами корпусов 14 см. На катамаране 3 было установлено три мачты, а на катамаране 4 - четыре мачты. К каждой из мачт были прикреплены паруса площадью 294 см². Форма парусов на катамаранах 3 и 4 отличалась от формы парусов на катамаранах 1 и 2, а их общая площадь составляла, соответственно, 882 см² и 1176 см². Вес катамаранов 3 и 4 был равен 280 грамм. Изображения второго и третьего варианта макета парусной энергетической установки представлены на Рис. 1.



Рис. 1.Изображения второго (слева) и третьего (справа) вариантов макета парусной энергетической установки

Высота стенок бассейна была равна 8 см. В качестве герметического материала при заполнении бассейна водой использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 200 микрон. В вершине располагалось крепежное устройство для лески, толщиной 0,3 мм, имитирующей кабель-трос, присоединяющий в реальном масштабе катамаран к месту крепления на морском дне, куда подведен кабель от гидрогенератора.

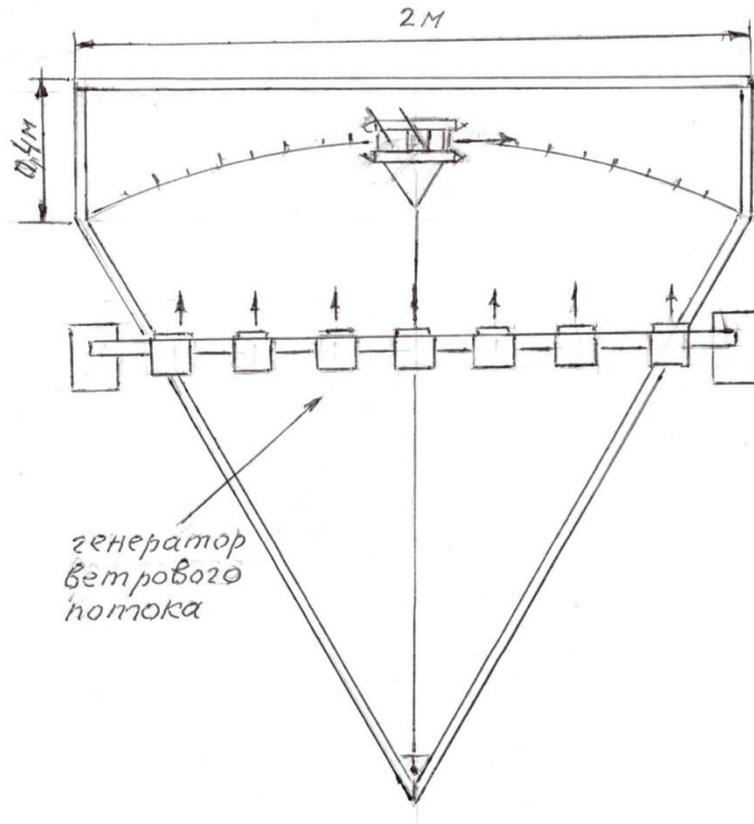


Рис. 2. Схема экспериментального бассейна. В центре дуги показано положение катамарана.

Над экспериментальным бассейном располагался генератор ветрового потока. Он был выполнен в виде системы вытяжных вентиляторов в количестве 8 штук, расположенных на рейке длиной 2 метра на расстоянии 22 см друг от друга. Концы рейки закреплены на стойках высотой 22 см. Конструкция генератора ветрового потока была разработана на основе полученной трехмерной картины ветрового поля отдельного вентилятора (Рис. 3).

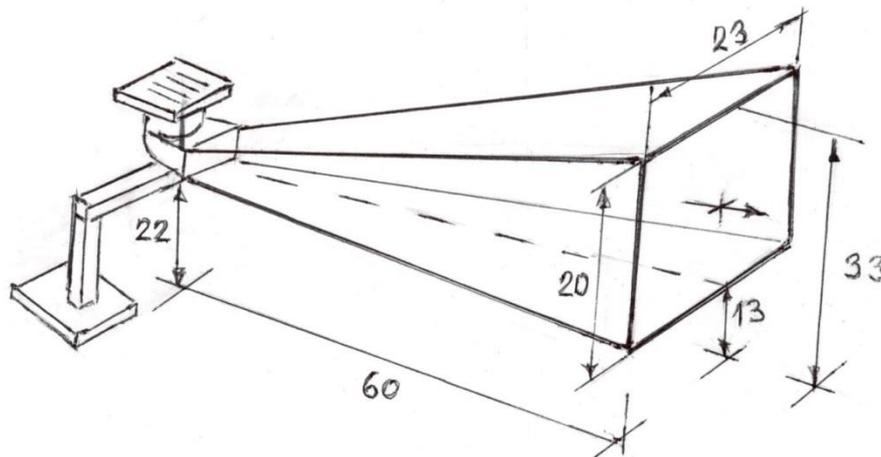


Рис. 3. Трехмерная картина ветрового поля вытяжного вентилятора

Высота расположения генератора ветрового потока определялась так, чтобы на расстоянии 60 см от выходных отверстий генератора нижняя граница ветрового потока совпадала с нижней кромкой парусов катамарана при его движении по дуговой траектории. Скорость ветра на этом расстоянии равнялась 3,6 м/с.

В начале эксперимента катамаран соединялся посредством удерживающей лески с крепежным устройством и включался генератор ветрового потока, после чего катамаран начинал двигаться по круговой траектории. В точках поворота дистанционно с помощью пульта управления подавался сигнал изменения положения парусов, и катамаран начинал двигаться в обратную сторону. В ходе экспериментов движение катамарана снималось на камеру, установленную на высоте 1.5 м над траекторией движения катамарана. По полученным записям движения катамарана по траектории строились графики движения катамарана и определялась его скорость в различных точках траектории.

3 Результаты экспериментов и их обсуждение

Пути повышения скорости парусного судна определяются из соотношения сил, действующих на него со стороны воздушного и водного потоков. Сила воздействия со стороны воздушного потока пропорциональна площади парусов, а сила воздействия со стороны водного потока пропорциональна произведению квадрата скорости судна на площадь сечения водного потока, взаимодействующего с его корпусом. При движении парусного судна с постоянной скоростью эти силы равны и направлены в противоположные стороны. При неизменной силе со стороны воздушного потока скорость парусного судна можно увеличить путем уменьшения площади сечения водного потока, взаимодействующего с его корпусом, что можно сделать за счет уменьшения веса судна.

Со всеми типами катамаранов, описанных выше, были проведены экспериментальные исследования для определения скорости их движения по дуговой траектории при различном весе и площади парусов. Для того, чтобы выяснить, какое влияние оказывает гидрогенератор на скорость движения катамаранов, проводилось исследование движений катамаранов с гидрогенератором и без гидрогенератора. График движения катамарана 3 с гидрогенератором представлен на Рис. 4.

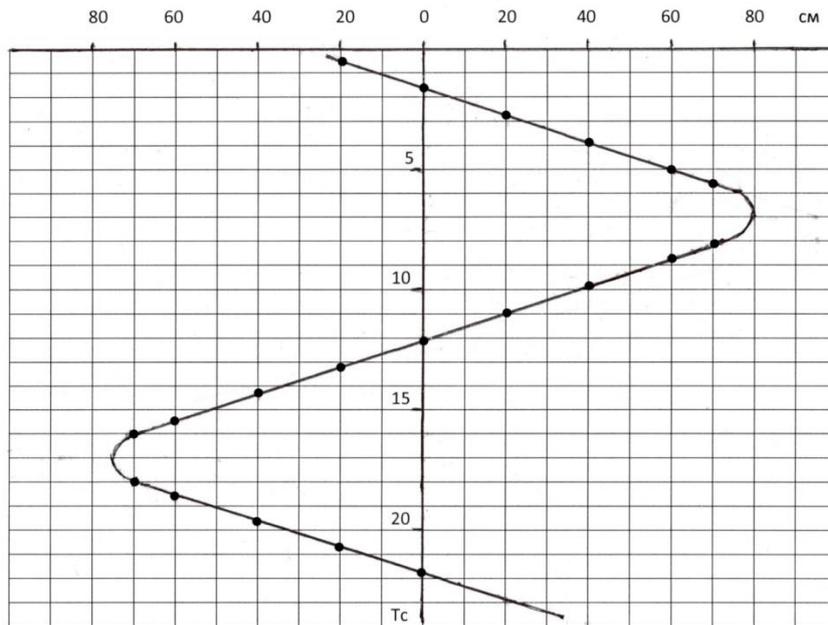


Рис. 4. График движения катамарана 3 с гидрогенератором

Данные о средней скорости движения катамаранов в экспериментах представлены в таблице 1. Приведенные в таблице 1 скорости катамаранов можно представить в виде функциональной зависимости, введенной на основе учета сил, определяющих скорость его движения. Скорость движения катамаранов определяется воздействием воздушного потока на паруса катамарана, взаимодействием водного потока с корпусом катамарана.

Таблица 1. Средняя скорость катамаранов при движении с гидрогенератором и без гидрогенератора.

Тип катамарана	Скорость движения, см/с			
	Катамаран 1	Катамаран 2	Катамаран 3	Катамаран 4
Скорость катамарана с гидрогенератором	7,7	13,8	18,2	21,0
Скорость катамарана без гидрогенератора	12,5	17,5	23,8	27,1
Отношение скоростей	1,6	1,3	1,3	1,3

Катамаран движется по дуговой траектории в некотором угловом интервале с точками поворота, расположенными симметрично относительно направления ветра. В некотором угловом интервале положение парусов по отношению к направлению ветра меняется не значительно, поэтому силу ветра, действующую на катамаран и его скорость можно считать постоянными. Сила, действующая со стороны воздушного потока F , пропорциональна площади парусов Q , а сила воздействия водного потока пропорциональна произведению квадрата скорости катамарана V^2 на площадь сечения S , перпендикулярную водному потоку, которую образуют корпуса катамаранов. При равномерном движении силы воздействия на катамаран воздушного и водного потоков равны и направлены в противоположные стороны:

$$k_1 Q = k_2 V^2 S \quad (1)$$

откуда

$$V = A\sqrt{D} \quad (2)$$

где $D = Q/S$

Соотношение $D = Q/S$ показывает, какая величина площади катамарана приходится на единицу площади сечения, препятствующему его движению со стороны водного потока. Из экспериментов было определена величина $A = 2,3$ для скорости ветра $3,6$ м/с.

При движении катамарана без гидрогенератора площадь сечения S_1 равна миделевому сечению, которое находится из соотношения

$$LS_1 = V_b \quad (3)$$

где L – длина корпусов катамарана, V_b – объем вытесненной катамараном воды, равный весу катамарана.

При движении катамарана с гидрогенератором площадь сечения S_2 находится экспериментально. При движении катамарана с гидрогенератором и без гидрогенератора с одной и той же площадью парусов силы сопротивления в обоих случаях равны, но отличаются произведением площади сечения сопротивления на квадрат скорости, т.е.

$$S_1 V_1^2 = S_2 V_2^2, \quad (4)$$

откуда

$$S_2 = S_1 (V_1/V_2)^2 \quad (5)$$

где соотношение V_1/V_2 можно получить из экспериментов и использовать в расчетах.

В таблицах 2 и 3 приводятся экспериментальные данные, позволяющие представить скорость движения катамаранов как функцию соотношения D при их движении по круговой траектории с гидрогенератором и без гидрогенератора.

Таблица 2. Характеристики движения катамаранов без гидрогенератора.

Тип катамарана	Катамаран 1	Катамаран 2	Катамаран 3	Катамаран 4
Площадь парусов $Q, \text{см}^2$	430	645	882	1176
Вес, г	420	420	280	280
Площадь сечения $S_1, \text{см}^2$	14	14	8,75	8,75
Соотношение $D = Q/S_1$	31	46	101	134
Скорость без гидрогенератора, см/с	12,5	17,5	23,8	27,1

Таблица 3. Характеристики движения катамаранов при их движении с гидрогенератором

Тип катамарана	Катамаран 1	Катамаран 2	Катамаран 3	Катамаран 4
Площадь парусов $Q, \text{см}^2$	430	645	882	1176
Вес, г	420	420	280	280
Площадь сечения $S_2, \text{см}^2$	35,8	23,6	14,7	14,7
Соотношение $D = Q/S_2$	12	27	60	80
Скорость с гидрогенератором, см/с	7,7	13,8	18,2	21,0

Приведенные в таблицах 2 и 3 данные о скоростях катамаранов всех типов при их движении с гидрогенератором и без гидрогенератора представлены на Рис. 5. Там же приведена кривая $V = A\sqrt{D}$, где $D = Q/S$, Q - площадь парусов, а S - площадь сечения сопротивления водного потока. $A = 2,3$.

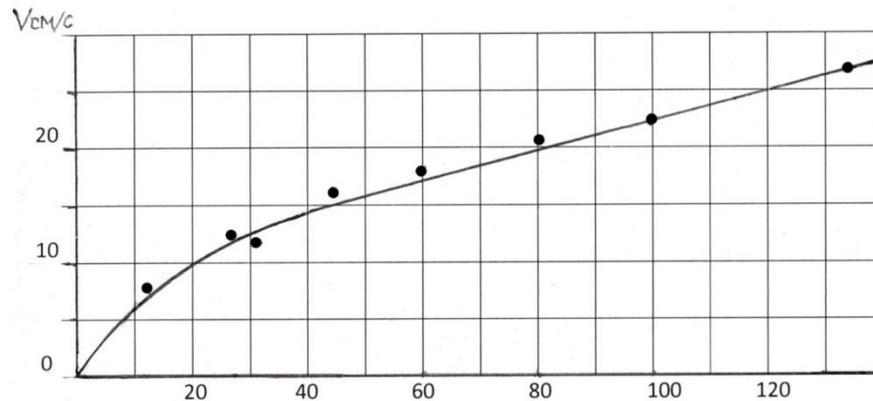


Рис. 5. График зависимости скорости движения всех типов катамаранов при их движении с гидрогенератором и без генератора как функция D. Точки - экспериментальные результаты.

4 Выводы

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность использования катамарана в качестве парусной энергетической установки и оригинальную схему позиционирования этой установки в прибрежной зоне, что потенциально открывает возможность снижения себестоимости получаемой электрической энергии. Для малоразмерного макета парусной энергоустановки экспериментально получены зависимости скорости движения катамарана от площади парусов и веса катамарана. Полученная функциональная зависимость скорости катамарана от соотношения площади парусов и площади сечения сопротивления движению катамарана позволяет определять динамические характеристики катамаранов и оптимизировать площадь парусов, вес и длину корпусов катамарана. Результаты экспериментов могут использоваться для решения задачи повышения мощности парусных энергетических установок в реальном масштабе.

Для реализации предложенной парусной энергетической установки необходимо также решить задачу автоматического управления его движение по траектории. Решение этих задач будет являться предметом исследований в следующих экспериментах.

Литература

1. IRENA Statistics Time Series. [электронный ресурс] URL: <https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> дата обращения: 30.06.2021.

2. Renewable Power Generation Costs [электронный ресурс] URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. дата обращения: 30.06.2021.
3. Плавающие ветряки [электронный ресурс] URL: <http://savenergy.info/page/floating-windmills/>, дата обращения: 30.06.2021.
4. WindFloatAtlanticProject [электронный ресурс] URL: <https://www.power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project>, дата обращения: 30.06.2021.
5. Патент РФ № 2 722 760 Парусная установка, преобразующая энергию потоков двух сред. URL: <https://edrid.ru/rid/220.018.2431.html>.
6. Чекарев К.В., Залиханов А.М., Соловьев Д.А., Дегтярев К.С. Парусная энергетическая установка, преобразующая энергию потоков двух сред // Окружающая среда и энергоснабжение, №3, 2020, с. 39-46.

References

1. IRENA Statistics Time Series. [internet resource] URL: <https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> reference date: 30.06.2021.
2. Renewable Power Generation Costs [internet resource] URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. reference date: 30.06.2021.
3. Plavayushchievetryaki [internetresource] URL: <http://savenergy.info/page/floating-windmills/>, reference date: 30.06.2021.
4. WindFloatAtlanticProject [internet resource] URL: <https://www.power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project>, reference date: 30.06.2021.
5. Patent of Russian Federation № 2 722 760, date 03.06.2020, URL: <https://edrid.ru/rid/220.018.2431.html>.
6. Chekarev K.V., Zalihanov A.M., Solovyov D.A., Degtyarev K.S. Wind-driven power machine, transforming energy of the two environs // Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES) №3(2020) DOI: 10.5281/zenodo.4139506

CATAMARAN AS A SAILING POWER PLANT: INCREASING SPEED PARAMETERS

^{1,2}Chekarev Konstantin

^{1,3}Zalihanov Alim

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²E-mail: kostya-chekarev@yandex.ru

³E-mail: bulungu@yandex.ru

Abstract. Installations that convert kinetic wind energy into electricity, including floating wind turbines, are large due to the low air density. The authors propose

a sailing power plant that converts energy of the wind flow into energy of the water flow, which is used to generate electricity. That makes it possible to reduce the size of the energy converter. A model of a sailing power plant was created. It was made as catamaran-wise, symmetrical with respect to the bow and stern, which makes cyclical movements along an arc of a circle in an angular interval specified with respect to the direction of the wind. Laboratory studies showed the fundamental feasibility of the installation, though its implementation requires to solve a number of problems, in particular, to determine design solutions to increase the speed of the catamaran. There were created several versions of the catamaran model of different weights, with a different number of masts and sail areas, with which experimental studies were carried out. The article presents the results of these studies.

Keywords: wind power, hydropower, offshore power plants, sailing vessel, sailing power plant