

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-45-57

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИПА

Шаманин С.Ю., Блинов В.Л., Савченко В.В., Бродов Ю.М

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия shamanin0090@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка и создание экспериментально стенда, проведение натурного эксперимента, верификация разработанной численной модели плоского аэродинамического профиля S809 на основе его безразмерных характеристик, произвести анализ обтекания профиля при различных углах атаки. МЕТОДЫ. Рассмотрена методика исследования структуры потока вокруг ветряной турбины с использованием численных методов газовой динамики, основанных на решении системы уравнений Навье-Стокса. Использованы математические методы моделирования с помощью модели турбулентности k-є и SST. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам проведенного исследования спроектирован лабораторный стенд при помоши систем автоматизированного проектирования САПР и изготовлен на 3D принтере методом FDM печати. Проведено экспериментальное исследование зависимости частоты вращения ветряной турбины от угла установки лопасти и получаемого напряжения в сети, изменение коэффициента мощности и КПД ветряной электроустановки в зависимости от скорости ветра. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная ветряная турбина обладает мощностью 2,6 Вт при скорости ветра 4 м/с. Данное изобретение рекомендуется использовать с целью обучения методам проектирования и конструирования аналогичных установок. Для разработанного ветрогенератора возможно проводить оптимизацию работы с использованием метода численного трехмерного термогазодинамического моделирования, оценивать характер течения потока на нерасчетных режимах работы, что ускоряет процесс создания конечной установки и улучшает ее параметры эффективности.

Ключевые слова: ветряная турбина; экология; характеристика; вычислительная газовая динамика; верификация; возобновляемые источники энергии.

Для цитирования: Шаманин С.Ю., Блинов В.Л., Савченко В.В., Бродов Ю.М. Исследование ветряной турбины малой мощности горизонтального типа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 45-57. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-45-57.

INVESTIGATION OF A HORIZONTAL LOW POWER WIND TURBINE

SYu. Shamanin, VL. Blinov, VV. Savchenko, YuM. Brodov.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia shamanin0090@gmail.com

Abstract: THE PURPOSE. Development and creation of an experimental stand, carrying out a full-scale experiment, verification the numerical model of a NREL S809 airfoil based on its dimensionless characteristics, analyze the flow around the airfoil at different angles of attack. METHODS. A technique for studying the flow structure around a wind turbine using numerical methods of gas dynamics based on solving the system of Navier-Stokes equations is considered. Mathematical modeling methods were used using the k- ε and SST turbulence model. RESULTS. In this study, a laboratory stand is designed using CAD systems and created using additive FDM printing technologies An experimental study of the dependence of the rotation speed on the blade angle and the resulting voltage in the electric system, the change in the power factor and efficiency of a wind power plant depending on the wind speed was carried out. CONCLUSION. The developed wind turbine has a power of 2.6 W at a wind speed of 4 m / s. This invention is

Проблемы энергетики, 2023, том 25, № 1

recommended for the purpose of teaching methods of design and construction of similar installations. For the developed wind turbine, it is possible to optimize the work using the method of numerical three-dimensional thermogasdynamic modeling, to evaluate the nature of the flow at off-design operating modes, which speeds up the process of creating the final installation and improves its efficiency parameters.

Keywords: wind turbine; ecology; characteristic; CFD; verification; renewable energy sources.

For citation: Shamanin SYu., Blinov VL., Savchenko VV., Brodov YuM. Investigation of a horizontal low power wind turbine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (1): 45-57. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-45-57.

Введение (Introduction)

В современном мире запасы ископаемого топлива ограничены и его использование ведет к загрязнению окружающей среды. Все более привлекательным становится использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), к которым относятся: солнечная радиация, энергия ветра, энергия рек, приливов и океанских волн, энергия, заключенная в биомассе и органических отходах.

На сегодняшний день стоимость энергии, полученной с использованием возобновляемых источников, неуклонно снижается. Во многих странах мира проводятся исследования по разработке эффективных технологий получения экологически чистой энергии.

Российская Федерация обладает большими запасами ископаемого топлива, поэтому на данный момент переход на возобновляемые источники экономически не целесообразен. Тем не менее, развитие данных технологий должно осуществляться и в нашей стране, чтобы в будущем отечественные энергетические технологии были конкурентоспособны на мировом рынке. Кроме того, имеется ряд перспективных направлений, где подобные технологии находят обширное применение уже сегодня в нашей стране.

Настоящий проект направлен на разработку и развитие конкурентоспособных отечественных ветряных турбин с использованием обширного опыта, накопленного в области проектирования и совершенствования традиционных газотурбинных и паротурбинных установок [1].

Одной из главных проблем этого перспективного направления развития энергетики является создание высокоэкономичных и надежных электрических машин, способных длительно работать в напряженных динамических режимах, при частых перегрузках, температурных напряжениях и неблагоприятных условиях окружающей среды. Данное исследование охватывает всего лишь один раздел, который касается аэродинамики. Но именно этот раздел является одной из основ для создания высокоэкономичных и надежных электрических машин. Текущее исследование проводилось при скорости ветра от 4 до 5 м/с, что соответствует среднегодовому значению в большинстве регионов России [2].

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время для решения инженерных задач, связанных с аэродинамикой лопастей ветряных турбин, широко применяется математическое моделирование. При расчётном исследовании структура потока вокруг ветряной турбины изучается с помощью численных методов газовой динамики, основанных на решении системы уравнений Навье-Стокса. Использование математических уравнений для решения течения позволяет существенно уменьшить временные и материальные затраты, по сравнению с экспериментом. При этом важно понимать, что полученные данные являются результатом решения уравнений, достоверность которых может быть ниже, чем у эксперимента. Поэтому для получения более точных результатов проводится верификация получаемых данных на моделях, подвергшихся опытным испытаниям [1].

Первым этапом для проведения математического моделирования обтекания потоком аэродинамического профиля является построение геометрической модели. Для данного исследования был выбран аэродинамический профиль S809 [3]. Данный профиль относительной толщиной 21% был разработан в 1986 году национальной лабораторией возобновляемой энергии (*NREL*). Он является одним из членов семейства аэродинамических профилей *NREL*, группы аэродинамических профилей, специально разработанных для ветряных турбин с горизонтальной осью.

С помощью созданной геометрической модели была создана её конечно-элементная модель, в которой проводится исследование (рис. 1). В данной работе строилась

© Шаманин С.Ю., Блинов В.Л., Савченко В.В., Бродов Ю.М.

неструктурированная сетка вследствие сложности геометрии. Количество элементов домена аэродинамического профиля для приближенного расчёта с помощью низкоренольдсовой двухпараметрической модели турбулентности k-є, составило около 215000 ячеек. Величина максимального y+ при числе Рейнольдса 1x10⁶ равна 100. Количество элементов домена для расчетов с помощью низкоренольдсовой модели турбулентности SST составило около 1000000 ячеек. Величина максимального y+ при числе Рейнольдсовой модели турбулентности SST составило около 1000000 ячеек. Величина максимального y+ при числе Рейнольдса 1x10⁶ равна 5. Для двумерного моделирования ставилась стационарная задача. Чтобы задать y+ использовалось то же число Рейнольдса 1x10⁶, которое использовалось в эксперименте в аэродинамической трубе Университета Делфта [4].



Рис. 1. Сетка домена аэродинамического профиля Fig. 1. Aerodynamic domain grid equal to 1 million равная 1 миллиону ячеек и схема задания cells and boundary condition setting scheme граничных условий

Схема задания граничных условий для исследуемой геометрии показана на рисунке 1. На поверхности "*Inlet*" задавались условия входа рабочего тела, а именно полная температура равная 293 К и скорость 15,17 м/с. На поверхности "*Free*", через которую рабочее тело выходит из расчетной области задавалось значение *Open*, а именно статическое давление. Данный параметр использовался для того, чтобы исключить влияние стенок на результаты двумерного моделирования. На поверхностях "*Sim*" (фронтальная плоскость) обоих типов задавалось условие "*Symmetry*". Данный параметр используется, когда модель симметрична и на нее действуют одинаковые силы с двух сторон. При выборе данного параметра значительно сокращается расчетное время для решения задачи. Критерий сходимости установлен равным 1x10⁻⁶.

Прогнозирование характеристик аэродинамического профиля на режимах с наибольшей подъемной силой является важной задачей для ветроэнергетики, авиации и турбомашин различного назначения. Максимальный коэффициент подъемной силы и соответствующий угол атаки систематически прогнозируются с помощью уравнения Навье-Стокса (уравнения движения вязкой жидкости *RANS*) в сочетании с различными полуэмпирическими моделями турбулентности. Наибольшую сложность представляет – моделирование отрыва ламинарного слоя от стенки аэродинамического профиля в той же точке, где происходит, отрыв при проведении эксперимента [5]. Эта сложность вызвана задержкой отрыва ламинарного пограничного слоя при неблагоприятном градиенте давления на спинке профиля.

Поскольку в рамках подхода *RANS* точка отрыва ламинарного пограничного слоя контролируется моделью турбулентности, одним из способов повышения точности прогнозирования характеристик аэродинамического профиля является специальная настройка моделей для такого класса потоков.

Математическое моделирование производилось с помощью двух моделей турбулентности: стандартная модель турбулентности k-є и модель турбулентности Ментера SST [6]. Модель турбулентности первого типа широко используется для решения инженерных задач за не большой промежуток времени. Использованная модель имеет два важных понятия такие как генерация P и диссипация є является полуэмпирической и опирается на феноменологический подход и результаты, полученные опытным путем [7]. Уравнение (1) обычно представляет собой кинетическую энергию k:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \overline{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k.$$
(1)

Уравнение (2) представляет собой рассеивание є:

Проблемы энергетики, 2023, том 25, № 1

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\overline{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(G_k - C_{3\varepsilon}G_b \right) - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}.$$
(2)

В модели SST учитывается вязкость вихрей. В полностью развитом турбулентном потоке эффект вязкости вихрей становится больше, чем молекулярная вязкость. Поскольку вихревая вязкость рассчитывается напрямую, то состояние турбулентного потока описывается достаточно подробно. Два уравнения (3,4) переноса выражают кинетическую энергию k и удельную скорость диссипации ω как:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \overline{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k.$$
(3)

и
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega\overline{u_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_{\omega}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right) + G_{\omega} - D_{\omega} + S_{\omega}.$$
 (4)

Проанализировав отчет *InTech* [7], было сделано еще несколько серий расчетов на модели турбулентности *SST*, при этом используемая модель была настроена следующим образом. Одна серия расчетов проводилась с коэффициентом перемежаемости равному 0,92 (*Intermittency* = 0,92), а другая серия расчетов с коэффициентом (A1=0,305). Данный коэффициент помогает предотвратить чрезмерное прогнозирование напряжения сдвига в пограничных слоях при неблагоприятном градиенте давления. Авторами [8] было установлено, что переход к нарастанию вязкого подслоя после его разрушения происходит не сразу, а перемежается с периодами чисто турбулентного течения, которое проникает очень близко к стенке, оставляя вязкому подслою лишь весьма малую толщину [9].

Можно предположить, что распространение пятен турбулентного течения в пространстве по поверхности стенки будет изменяться так же, как вероятность появления во времени турбулентного течения у стенки (что, вообще говоря, требует дополнительного исследования). Тогда количественной характеристикой такой вероятности может служить отношение времени существования турбулентного течения у стенки $t_{\rm T}$ к общему времени наблюдения T_0 (уравнение 5):

$$\gamma = \frac{t_T}{T_0}.$$
(5)

Параметр γ называется коэффициентом перемежаемости пристеночного течения. При $\gamma = 0$ имеет место чисто вязкое течение у стенки, при $\gamma = 1$ – течение у стенки турбулентное. В настоящем исследовании был использован коэффициент перемежаемости $\gamma = 0,92$.

Уравнение (6) переноса для перемежаемости определяется следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_{j}\gamma)}{\partial x_{j}} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\gamma}} \right) \frac{\partial\gamma}{\partial x_{j}} \right].$$
(6)

Проанализировав отчет исследователей из Санкт-Петербургского политехнического университета [10] была произведена настройка модели турбулентности *SST* при помощи коэффициента A1.

Определение вихревой вязкости (уравнение 7) включает в себя так называемый ограничитель *SST*, который вводится в модель, чтобы предотвратить чрезмерное прогнозирование напряжения сдвига в пограничных слоях при неблагоприятном градиенте давления. Поэтому поведение модели в таких пограничных слоях, а также отрыв потока на спинке аэродинамического профиля контролируется константой *A*1.

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega SF_2)} \tag{7}$$

Расчёты производились при использовании 4 узлов (тип запуска *HP MPI Distributed Parallel*) с их полной загрузкой путем распараллеливания процессов на каждом узле. Было

проведено 4 серии расчёта на рабочем теле *Air Ideal Gas*. Общее машинное время проведения расчетов составило 154 часа.

Результаты (Results)

В результате проведенных расчетов на разных моделях турбулентности были получены следующе данные для верификации: коэффициент подъемной силы (*Cl*), коэффициент сопротивления (*Cd*), коэффициент момента (*Cm*) и коэффициент распределения давления (*Cp*). Также показаны распределение давления и поле скоростей вокруг аэродинамического профиля.

Сравнение результатов, полученных при проведении численного моделировании, производится с результатами, полученными при испытаниях в аэродинамической трубе в Университете Делфта [4] и численном исследовании [3]. В этой работе численное моделирование двумерного профиля настроено для решения стационарной задачи, то есть до достижения устойчивого состояния. Однако при более высоких углах атаки из-за сложных условий потока некоторые области поля потока не могут достигнуть стационарного состояния. Результаты моделирования на модели турбулентности k- ε , SST, SST Intermittency 0.92 и SST коэффициент A1=0,305 представлены на рисунках 2, 3 и 4. Сравнив полученные данные можно сделать вывод, что до угла $10,2^{\circ}$ расчет можно проводить на модели турбулентности, k- ε для экономии времени и вычислительных мощностей, в этом диапазоне все модели турбулентности показывают примерно одинаковые результаты, но при углах атаки выше модель турбулентности SST показывает результаты с меньшей погрешностью.



Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента *Fig. 2. Impact of the Angle of Attack* подъемной силы от угла атаки



Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента Fig. 3. Resistance coefficient change depends on the сопротивления от угла атаки angle of attack



Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента Fig. 4. The Moment Ratio Change Depends on the момента от угла атаки Angle of Attack

Модель турбулентности *k*-*є* является надежной, экономичной и быстрой с точки зрения времени вычислений благодаря своей простоте в пограничном слое, однако, как было выявлено, модель имеет плохую производительность для решения сложных течений,

таких как отрыв потока, где имеется сильная кривизна линий тока и сильные градиенты давления. Поэтому расчет на малых углах атаки следует проводить с помощью этой модели турбулентности для экономии времени.

Так же необходимо сказать, что повышенная чувствительность модели SST обусловлена ее более высокой точностью в пограничном слое. Из-за сложности в пограничном слое модель SST, по-видимому, переоценивает вихри в этой области и потребляет больше вычислительного времени для достижения сходимости [4].

Проведя анализ погрешностей в процентах, для полученных результатов на моделях турбулентности *k-є* и *SST*, были получены следующие значения: осредненные значения процентной погрешности коэффициента подъемной силы для модели турбулентности *k-є* – 16,6% для *SST*– 16,9%; коэффициента сопротивления *k-є* – 164% для *SST*– 142%; коэффициента момента *k-є* – 18,9% для *SST*– 12,1%.

Проанализировав результаты, полученные при математическом моделировании, был сделан вывод, что именно переход (точка, где ламинарный поток превращается в турбулентный, которая может существенно влиять на состояние потока и флуктуации [11, 13]) стал причиной отклонений расчетных характеристик от экспериментальных. Данный вывод был сделан также исходя из проведенного анализа картин распределения скоростей и кинетической энергии вокруг аэродинамического профиля.

Уточнение результатов численного моделирования при помощи настройки модели турбулентности проводилось за счет коэффициента перемежаемости $\gamma = 0.92$ и коэффициента A1=0.305. Данные коэффициенты были выбраны для того, чтобы помочь вычислению пройти через точку перехода.

При проведении численного моделирования на модели турбулентности SST с коэффициентом перемежаемости равным $\gamma=0,92$ удалось приблизиться к экспериментальным данным. На графике характеристики аэродинамического профиля коэффициента подъемной силы от угла атаки видно, что расчетная характеристика идеально совпадает до угла 11,21°, далее происходит занижение значений полученной характеристики, но в целом кривая повторяет изгиб экспериментальной характеристики, значения коэффициента подъемной силы на последних углах атаки лежат ниже.

На графике коэффициента сопротивления от угла атаки видно, что при малых углах атаки (до 8°) кривая, полученная при моделировании на модели турбулентности SST Intermittency 0,92, ведет себя аналогичным образом, как и кривая, полученная при моделировании с помощью модели турбулентности SST. но после этого угла возникает отклонение кривой.

Наибольшую точность при моделировании показала модель турбулентности SST с коэффициентом A1=0,305. Кривые для графика коэффициента подъемной силы, полученные при модели турбулентности SST и SST A1=0,305, практически совпали. Это связано с тем, что точка отрыва от стенки профиля на этих моделях турбулентности находится практически в одном месте, а коэффициент A1 помогает наиболее точно определить коэффициент сопротивления и момента.

На графике коэффициента сопротивления от угла атаки видно, как кривая, полученная в результате математического моделирования на модели турбулентности *SST* с A1=0,305 имеет аналогичный растущий тренд, как и у экспериментальной кривой, но на последних углах атаки тренд продолжает увеличиваться, а экспериментальная характеристика нет.

Кривая коэффициента момента от угла атаки полученная при численном моделировании на модели турбулентности *SST* с *A*1=0,305 практически совпадает с результатами, полученными при модели турбулентности *SST* с коэффициентом перемежаемости равным 0,92.

Осредненные значения процентной погрешности коэффициента подъемной силы для модели турбулентности SST Intermittency 0,92 – 14,9% для SST с A1=0,305– 9,3%; коэффициента сопротивления SST Intermittency 0,92 – 126,1% для SST с A1=0,305– 48,2%; коэффициента момента SST Intermittency 0,92 – 13,2% для SST с A1=0,305– 12,8%.

Следующим этапом проведения верификации было сравнение графиков распределения коэффициента давления по длине профиля при разных углах атаки, полученных в результате численного моделирования с графиками, полученными при проведении эксперимента. График распределения для угла атаки 10,2° представлен на рис. 5.

В целом графики, полученные при математическом моделировании на моделях турбулентности SST с A1=0,305 и SST $\gamma = 0,92$ достаточно близки с экспериментальными кривыми на малых углах атаки, до угла $10,2^{\circ}$.

В результате анализа графиков распределения коэффициента давления по профилю можно сделать вывод, что моделирование на разных моделях турбулентности при маленьких углах атаки показывает одинаковые результаты, но после отрыва потока модели турбулентности k- ε становится труднее производить решения сложных течений, таких как отрыв потока, где имеется сильная кривизна линий тока и сильные градиенты давления. Также необходимо заметить, что в результате численного моделирования отрыв потока происходит дальше по профилю, чем при эксперименте. Абсолютно все модели турбулентности показали заниженные результаты коэффициента давления на спинке профиля. Наиболее близкие результаты показала модель турбулентности *SST* с A1=0,305 кроме последнего угла, где происходят нестационарные процессы.



Рис. 5. График распределения коэффициента Fig. 5. Graph of pressure coefficient distribution by давления по профилю (угол атаки $10,2^{\circ}$) profile (attack angle 10.2°)

Настоящий профиль использовался в дальнейшем при проектировании лопастей ветряной турбины. Для создания эффективной лопасти ветряной турбины были выбраны углы с наибольшей подъемной силой и с наименьшей силой сопротивления. При создании профилировщика для проектирования лопастей были использованы источники [11,12,13]. Принцип работы профилировщика заключается в масштабировании профилей и расчете их оптимальных углов установки на разных сечениях лопасти. Исходными параметрами профилировщика являются: скорость ветра, необходимая мощность ВЭУ, быстроходность ветроколеса и координаты безразмерного профиля.

На основе полученных газодинамических характеристик аэродинамического профиля был произведен расчет и проектирование лопастей ветряной турбины. Методика расчета была взята из книги по ветроэнергетике Кривцова, Олейникова и Яковлева [14].

Созданный лабораторный стенд является испытательной моделью, разработанной для нестационарных экспериментов. Ветрогенератор имеет 3 лопасти, спроектированных на основе аэродинамического профиля *S*809. Ветроколесо было спроектировано на среднегодовую скорость ветра равную 4 м/с, быстроходность ветроколеса равна 3,5, при этом мощность установки была задана равной 4,5 Вт.

Построение геометрической модели трехмерной ветряной турбины осуществлялось с помощью с *CAD* программ. Лопасть имеет длину равную 206 мм и состоит из 5 сечений. Координаты профилей для каждого радиуса, а также лопасть можно скачать из моего облачного хранилища [15]. Каждое поперечное сечение имеет различную длину хорды и угол кручения, ось кручения находится на 25% от линии хорды от передней кромки. Для проектирования лопасти разработан специальный программный код.

Следующим этапом работы было изготовление ветряной турбины с помощью FDM технологий. Все части ветряной турбины, кроме лопаток были распечатаны из пластика PLA (полилакрид). Данный вид пластика был выбран, так как он экологичный, прост в использовании и у него относительно низкая стоимость. Лопатки были напечатаны из пластика PETG (полиэтиленгликольтерефталат) так как он обладает наибольшей долговечностью, прочностью и термостойкостью. Ветровая турбина оптимизирована для получения выходной мощности 4,5 Вт при скорости ветра 5 м/с, что идеально подходит для зарядки аккумулятора.

Основной целью изготовления лабораторного стенда являлось экспериментальное определение энергетических характеристик ветроэлектрической установки (ВЭУ). Стенд позволяет:

1. снять зависимость выходной мощности генератора от скорости набегающего потока ветра,

2. построить теоретическую зависимость коэффициента мощности C_p и коэффициента момента C_m от быстроходности λ ,

3. снять зависимость $C_p(\lambda)$ и оценить эффективность выбранной рабочей точки,

4. определить частоту вращения встряной турбины при разных скоростях встра,

5. также позволяет получить напряжение и силу тока цепи с помощью комбинированного электроизмерительного прибора мультиметра.

Ротор оборудован датчиком измерения частоты вращения, углы установки лопасти устанавливаются вручную перед каждым экспериментом. При скорости ветра 4,004 м/с частота вращения составляет 540 об/мин, при 4,55 м/с – частота вращения 697 об/мин и при скорости ветра 5,23 м/с – частота вращения ветряной турбины равняется 857 об/мин.

Конструктивная схема агрегата и его фотография представлены на рисунке 6. В качестве фундамента использовалась ДСП покрытая белой глянцевой краской. Для того чтобы предотвратить раскачку ВЭУ во время работы сделаны растяжки из веревок через шуруп кольцо. На фундаменте располагается распределительная коробка, в которой располагается электрическая цепь питания турбины для преобразования постоянного тока.



стенда. 1 – фундамент; 2 – башня; 3 – Foundation; 2 - Tower; 3 - Windwheel; 4 - Gondola; встроколесо; 4 – гондола; 5 – виндроза в виде 5 - Tailed Vindrose хвоста

Рис. 6. Конструктивная схема лабораторного Fig. 6. Laboratory Bench Design Diagram. 1 -

Правильность расчета ветряной турбины и согласование ее параметров с параметрами ветрогенератора может быть оценена по экспериментальным зависимостям, которые определяются по специальной модели, схема которой приведена на рис. 7



Рис. 7. Схема экспериментальной установки: А и Fig. 7. Scheme of the experimental installation: A Б места замера скорости and B places of speed measurement

Работает установка следующим образом. Воздушный поток создается вентилятором 1, установленным в кожухе 2. Рабочее колесо вентилятора приводится двигателем постоянного тока (ДПТ). Скорость воздушного потока в м/с регулируется кнопками на вентиляторе, который имеет всего 3 режима работы.

Ветроколесо 3 приводит во вращение шаговый двигатель, работающий как генератор переменного тока. Напряжение и ток генератора измеряется с помощью мультиметра 6, а скорость ветра до и за ветроколесом измеряется с помощью анемометра 5.

© Шаманин С.Ю., Блинов В.Л., Савченко В.В., Бродов Ю.М.

При проведении эксперимента использовался компактный анемометр testo 425 со стационарно подсоединенным обогреваемым зондом температуры/скорости воздуха и телескопической рукояткой. Диапазон измерений от 0...+20 м/с. Погрешность $\pm(0,03$ м/с + 5% от измеряемых значений [16]. Измерение скорости ветра выполнялось следующим образом: зонд был установлен в середине лопасти на расстоянии 30 см перед и за турбиной. Стрелка на головке зонда указывает направление потока. Для определения корректного значения необходимо слегка повращать зонд в обоих направлениях, пока не отобразится максимальное значение.

Элементы ВЭУ обладают механической инерцией и после изменения величины скорости ветра была выдержана пауза для полной стабилизации частоты вращения ветроколеса [14,17].

В исследовании проведено три опыта. Первый направлен на определение скорости ветра на разных режимах работы вентилятора. Во время второго опыты осуществлялось снятие зависимости выходной мощности генератора от скорости набегающего ветрового потока. Третий опыт направлен на замер частоты вращения, КПД и мощности установки.

В первом опыте измерение скорости ветра производилось на расстоянии 0,3 метра до и после ветроколеса на среднем сечении лопасти. Для повышения точности эксперимента было сделано по 12 измерений на каждом режиме и в расчетах было учтено их среднее значение.

В результате проделанных замеров были получены следующие осредненные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режим работы вентилятора	Скорость ветра перед ветроколесом, м/с	Скорость ветра за ветроколесом, м/с
1	4,00	2,96
2	4,55	2,59
3	5,1	3,13

Замеры скоростей до и за ветроколесом

В опыте номер два, чтобы рассчитать электрическую мощность генератора, необходимо включить установку, выставить максимальное значение скорости ветрового потока и после стабилизации скорости вращения турбины определить скорость ветра и снять значения тока и напряжения. И так было проделано для 3-х режимов.

После проведенных измерений были найдены средние величины мощностей. На первом режиме мощность равна 2,57 Вт, на втором режиме 3,46 Вт, на третьем 4,51 Вт.

Электрическая мощность генератора рассчитывается по формуле (8):

$$P_{\mu} = I_{\mu} U_{\mu} \tag{8}$$

На рисунке 8 представлена графическая зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра, а на рисунке 9 изображена зависимость коэффициента мощности от коэффициента быстроходности.





Fig. 8 Graphical relation Ph(v) Fig. 9 Graphical relation Cp(Z)

Ветряная турбина была спроектирована на среднегодовую скорость ветра равная 4 м/с. При этой скорости ветра турбина должна вырабатывать 4,5 Вт. При проведении эксперимента максимальная мощность при скорости ветра равной 4 м/с составила 2,57 Вт. Погрешность, полученная в результате расчета, составляет 42,9%. Полученное отклонение

результатов связано с механическими потерями (не соосность вала, некачественные подшипники), маленьким КПД генератора (шагового двигателя) и газодинамическими потерями, так как в качестве источника ветра использовался вентилятор.

Предварительно полученный коэффициент мощности *Ср* равняется 0,443, а коэффициент быстроходности *Z* равняется 3,5. Погрешность, полученная в результате теоретического расчета, составила 12,13%.

При эксперименте построена зависимость частоты вращения и напряжения от угла установки лопасти, представленная на рисунке 10.



Рис. 10. Графическая зависимость частоты *Fig. 10. Graphical dependence of speed and voltage* вращения и напряжения от угла установки *on blade angle* лопасти

В результате проделанных замеров были получены следующие значения при разной скорости ветра, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Скорость ветра, м/с	Частота вращения, об/мин	Напряжение в сети, В
4,00	540	16,0
4,55	697	21,2
5,23	857	26,6

Максимальные значения при разной скорости ветра

В опыте три, температура окружающей среды на первом режиме составляет 23,2°, на втором и третьем режиме 23,8°. С помощью линейной интерполяции была найдена плотность воздуха для трех температур: $\rho_1=1,192$; $\rho_2=1,189$; $\rho_3=1,189$. Исходя из полученных скоростей до и за ветряной турбиной были найдены значения коэффициента мощности, мощности на роторе и КПД, результаты сведены в таблице 3.

Таблица 3

	* *	· · ·	
Скорость ветра, м/с	Коэффициент мощности С _р	Мощность на роторе, Вт	КПД ВЭУ с учетом механических потерь
4,00	0,395	2,969	0,277
4,55	0,530	5,843	0,371
5,23	0,523	8,768	0,366

Величины коэффициента мощности, мощности на роторе и КПД

В результате проведенного эксперимента была достигнута поставленная задача, была спроектирована и изготовлена ветряная турбина мощностью 2,6 Вт при скорости ветра 4 м/с. Также был проведен анализ зависимость частоты вращения и напряжения от угла установки лопасти.

Заключение (Conclusions)

1. В данной работе был проделан анализ типа модели турбулентности для верификации данных обтекания двумерного аэродинамического профиля S809, получены графические зависимости коэффициентов подъемной силы, сопротивления и момента от угла атаки, построены графики коэффициента давления по длине профиля, проведен анализ течения вокруг аэродинамического профиля. В результате анализа графиков распределения коэффициента давления по длине профиля, проведен анализ течения вокруг аэродинамического профиля. В результате анализа графиков распределения коэффициента давления по профилю можно сделать вывод, что моделирование на разных моделях турбулентности при маленьких углах атаки показывает одинаковые результаты, но после отрыва потока модели турбулентности k- ε становится труднее производить решения сложных течений, таких как отрыв потока, где имеется сильная кривизна линий тока и

сильные градиенты давления. Также необходимо заметить, что в результате численного моделирования отрыв потока происходит дальше по профилю, чем при эксперименте.

2. При получении расчетных характеристик профиля было выявлено, что наименьшую погрешность вычисления имеет модель турбулентности SST A1=0,305. За исключением некоторых углов большинство числовых результатов имеют ошибку в пределах 20%.

3. Опыт, полученный исходя из решения двумерной задачи, был применен для создания лабораторного стенда с использованием аддитивных технологий *FDM* печати. Разработанная установка позволила произвести верификацию данных численного моделирования и эксперимента.

4. В результате проведенного эксперимента была достигнута поставленная задача, была спроектирована ветряная турбина мощностью 2,6 Вт при скорости ветра 4 м/с. Данное изобретение направлено на обучение методам проектирования и конструирования ветряных турбин.

Литература

1. Насырова Е.В., Тимербаев Н.Ф., Леухина О.В., Мазаров И.Ю. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № (6). С. 39-50.

2. Манкевич О.О., Оценка энергопотенциала ветроэнергетики на территории Российской Федерации // Вестник магистратуры, Учредители: ООО Коллоквиум (Йошкар-Ола), 2020. С. 10-12.

3. Шаманин С.Ю., Блинов В.Л., Горюнова И. Ю., Верификация численной модели обтекания потоком воздуха аэродинамического профиля s809 для лопастей ветряной турбины // Международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» Екатеринбург, 2019. С.691-694.

4. Hand M., Simms D., Fingersch L. J., Jager D., Larwood S., J.Cotrell, and Schreck, S. Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns.// Tech. rep., National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2001. pp. 13-59.

5. Somers, D. M. Design and Experimental Results of the S809 Airfoil // Pennsylvania, Airfoils, Incorporated State College, 1997.

6. Ansys helper [Электронный ресурс] URL: https://ansyshelp.ansys.com/ Дата обращения: 01.08.2019.

7. Advances in wind power. Edited by Rupp Carriveau. [Электронный ресурс] URL: https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power Дата обращения: 21.08.2019.

8. Байков В.Н., Волынов М.А., Взаимная согласованность закономерностей течения и гидравлического сопротивления // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 133—140.

9. Брянская Ю.В., Перемежаемость течения при переходном режиме гидравлического сопротивления // Вестник МГСУ. 2013.

10. Matyushenko A. A., Garbaruk A. V., Adjustment of the k- ω SST turbulence model for prediction of airfoil characteristics near stall // Journal of Physics: Conference Series 2016. 769 c.

11. Pironneau O., Rodi W., Ryhming I.L., Numerical Simulation of Unsteady Flows and Transition to Turbulence // UK, Cambridge University Press, 2008.

12. Савенко А.Е., Османов Э.Ш., Расчет реализуемой мощности и выработки электроэнергии одиночно стоящей ветроустановкой // Вестник КГЭУ. 2019. №1 (41) С. 68-78.

13. Aleksin, V.A. Numerical Simulation of the Interaction of Unsteady Surface Blowing (Suction) with Turbulent Near-Wall Flow // Fluid Dynamics, Maik Nauka/Interperiodica Publishing. 2019. C. 797-811.

14. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И., Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика // Харьков: Нац. Аэрокосм. Ун-т, Севастополь: Севаст. Нац. Техн. ун-т, 2004. - 519с.

15. My blade [Электронный ресурс] URL: https://drive.google.com/drive/folders/ 1pAidAFoU27PKSZAWu1VawrrQ37x4p8iJ?usp=sharing. Дата обращения: 20.09.2019.

16. Теsto 425, Термоанемометр со стационарно подсоединенным зондом с обогреваемой струной [Электронный ресурс] URL: https://www.chipdip.ru/product/testo-425 Дата обращения: 04.09.2019.

17. Березкин М.Ю., Синюгин О.А. География инвестиций в возобновляемую энергетику мира // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. №4.

Авторы публикации

Шаманин Сергей Юрьевич – студент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. E-mail: shamanin0090@gmail.com.

Блинов Виталий Леонидович – канд.техн.наук., доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. E-mail: v.l.blinov@urfu.ru.

Савченко Владислав Владимирович – аспирант, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Екатеринбург. E-mail: Vladislav.savchenko@urfu.me.

Бродов Юрий Миронович д-р техн. наук, зав. кафедрой «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. E-mail: u.m.brodov@urfu.ru.

References

1. Nasyrova EV, Timerbayev NF., Leukhina OV, et al. Data analysis wind monitoring in the Republic of Tatarstan. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):39-50.

2. Mankevich O.O., Assessment of the energy potential of wind energy on the territory of the Russian Federation. *Vestnik magistratury*, OOO Kollokvium (Yoshkar-Ola), 2020. pp. 10-12.

3. Shamanin SYu, Blinov VL, Goryunova IYu. *Verification of the numerical model of air flow around the airfoil s809 for wind turbine blades*. International Scientific and Practical Conference «Energy and Resource Saving. Power supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear Energy»Yekaterinburg, 2019, pp. 691-694.

4. Hand M, Simms D., Fingersch L. J., Jager D., et al. *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*. Tech. rep., National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2001. pp. 13-59.

5. Somers DM. *Design and Experimental Results of the S809 Airfoil*. Pennsylvania, Airfoils, Incorporated State College, 1997.

6. Ansys helper Available at: URL: https://ansyshelp.ansys.com/ Accessed to: 01.08.2019.

7. Advances in wind power. Edited by Rupp Carriveau. Available at: URL: https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power Accessed to: 21.08.2019.

8. Baikov VN, Volynov MA. Mutual consistency of the laws of flow and hydraulic resistance. *Vestnik MGSU*. 2013;5:133-140.

9. Bryanskaya YuV, Intermittency of the flow in the transient regime of hydraulic resistance. *Vestnik MGSU*. 2013.

10. Matyushenko AA, Garbaruk AV, Adjustment of the k- ω SST turbulence model for prediction of airfoil characteristics near stall. *Journal of Physics: Conference Series* 769. 2016.

11. Pironneau O, Rodi W, Ryhming IL, *Numerical Simulation of Unsteady Flows and Transition to Turbulence*. UK, Cambridge University Press, 2008.

12. Savenko AE, Osmanov ESh. Calculation of the realized power and electricity generation by a single-standing wind turbine. *Bulletin of KSPEU*. 2019;1 (41):68-78.

13. Aleksin VA. Numerical Simulation of the Interaction of Unsteady Surface Blowing (Suction) with Turbulent Near-Wall Flow. Fluid Dynamics, Maik Nauka. Interperiodica Publishing pp. 797-811.

14. Krivtsov VS, Oleinikov AM, Yakovlev AI. *Inexhaustible energy*. Book. 2-Vetroenergetika. Kharkiv: National Aerospace University, Sevastopol: Nat. Tech. University of Sevastopol 2004. pp. 519.

15. *My blade* Available at: URL: https://drive.google.com/drive/folders/ 1pAidAFoU27PKSZAWu1VawrrQ37x4p8iJ?usp=sharing. Accessed to: 20.09.2019.

16. Testo 425, *Thermo-anemometer with a permanently connected hot-wire probe* Available at: URL: https://www.chipdip.ru/product/testo-425 Accessed to: 04.09.2019.

17. Berezkin MYu, Sinyugin OA. Geography of investment in the renewable energy sector of the world. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. Seriya 5, Geografiya. 2018;(4):68-74.

Authors of the publication

Sergei Yu. Shamanin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Vitalii L. Blinov - Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Vladislav V. Savchenko – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Yurii M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Получено	19.12.2022г.
Отредактировано	26.12.2022г.
Принято	16.01.2023г.