



УДК 621.548.5

МРНТИ 50.43

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_38_3_15

А. Фазылова¹, К. Алипбаев¹, А. Оразалиева¹, А. Аден^{1*}

¹ Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы,
Республика Казахстан

*¹E-mail: a.aden@aes.kz

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РОТОРА ДАРЬЕ

Аннотация. В данной статье представлено теоретическое и численное моделирование ротора Дарье – одного из наиболее популярных роторов для ветровых турбин с вертикальной осью вращения. Проведены расчёты аэродинамических характеристик, включая эффективную площадь ротора, силу сопротивления, подъёмную силу, крутящий момент и мощность. Использованы аналитические методы и численное моделирование в среде SolidWorks для оценки работы ротора при различных параметрах воздушного потока. Также выполнен анализ деформации конструкции при критических нагрузках, что позволило оценить её устойчивость и эффективность. Полученные результаты подтверждают способность ротора Дарье к стабильной работе в условиях высоких скоростей ветра и его высокую механическую прочность.

Ключевые слова: ротор Дарье, численное моделирование, аэродинамические характеристики, ветровая турбина, деформационный анализ.

Введение

Ветровая энергетика является одной из наиболее перспективных отраслей возобновляемых источников энергии. В последние десятилетия активное развитие технологий ветроэнергетики привело к совершенствованию конструкций роторов, повышению их эффективности и снижению эксплуатационных затрат. Особый интерес представляют роторы с вертикальной осью вращения (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine), среди которых ротор Дарье является одним из наиболее распространённых решений. Его основные преимущества включают возможность работы при низких скоростях ветра, меньшую чувствительность к изменению направления воздушного потока и простоту конструкции.

За последние годы проведено множество исследований, посвящённых аэродинамическому моделированию ротора Дарье. Так, в работе [1] представлены результаты численного моделирования с использованием метода конечных элементов (CFD-анализ) для изучения влияния геометрии лопастей на коэффициент мощности. В исследовании [2] рассматриваются экспериментальные данные, полученные в аэродинамической трубе, и их сравнение с теоретическими моделями. В работе [3] проведён анализ устойчивости конструкции ротора Дарье при различных скоростях воздушного потока с учётом деформационных характеристик материалов.

Научная новизна данной статьи заключается в объединении теоретических методов и численного моделирования в единую методику комплексной оценки ротора Дарье,

включающей не только аэродинамические характеристики (подъёмную силу, сопротивление, крутящий момент, мощность), но и механическую устойчивость конструкции при высоких скоростях ветра. Особенностью подхода является использование трёхмерной САД-модели ротора с криволинейными лопастями в среде SolidWorks для анализа как аэродинамики, так и деформационных нагрузок.

Гипотеза исследования состоит в том, что ротор Дарье с оптимизированной геометрией лопастей способен эффективно функционировать при значительных скоростях воздушного потока, обеспечивая при этом минимальные деформации конструкции, что повышает его надёжность и устойчивость в эксплуатации. Настоящая работа направлена на проверку данной гипотезы и расширение понимания возможностей применения ротора Дарье в ветроэнергетических установках. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании эффективных ветрогенераторов с вертикальной осью вращения, особенно в условиях повышенной ветровой нагрузки.

Материалы и методы.

В данном исследовании использованы численные и аналитические методы для моделирования аэродинамических характеристик ротора Дарье. Для расчёта основных параметров были применены следующие формулы. Эффективный радиус лопасти [4]:

$$R_{\text{эфф}} = k \cdot R \quad (1)$$

Эффективный радиус лопасти определяется с учетом геометрических характеристик ротора. Здесь — эмпирический коэффициент, учитывающий снижение площади взаимодействия с потоком воздуха (для криволинейных лопастей он составляет 0.95), R — радиус ротора. Эффективная ометаемая площадь ротора [5]:

$$A_{\text{эфф}} = 2 \cdot h \cdot R_{\text{эфф}} \quad (2)$$

Данная формула используется для определения площади, ометаемой ротором во время его вращения. Высота ротора и эффективный радиус влияют на взаимодействие с потоком воздуха, что напрямую сказывается на генерируемой мощности. Данная формула используется для определения площади, ометаемой ротором во время его вращения. Высота ротора и эффективный радиус влияют на взаимодействие с потоком воздуха, что напрямую сказывается на генерируемой мощности. Сила сопротивления определяется аэродинамическими характеристиками ротора и зависит от коэффициента сопротивления C , плотности воздуха ρ , скорости воздушного потока $V_{\text{п}}$ и эффективной площади ротора $A_{\text{эфф}}$. Эта сила действует против направления движения лопастей [6]:

$$F_a(\theta) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot A_{\text{эфф}} \cdot V_{\text{п}}^2 \quad (3)$$

Подъёмная сила возникает в результате разницы давлений на верхней и нижней поверхностях лопастей. Она рассчитывается аналогично силе сопротивления, но с использованием коэффициента подъёмной силы [7]:

$$F_n(\theta) = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot A_{\text{эфф}} \cdot V_{\text{п}}^2 \quad (4)$$

Момент силы можно определить по формуле [7]:

$$T_r = 0,5 \cdot (F_a(\theta) - F_n(\theta)) \cdot R_{\text{эфф}} \quad (5)$$

Этот момент описывает крутящий эффект, создаваемый аэродинамическими силами на роторе. Разность сил сопротивления и подъёма умножается на эффективный радиус, что определяет результирующий крутящий момент. Угловая скорость ротора определяется через коэффициент скорости, который учитывает соотношение линейной скорости края лопасти к скорости воздушного потока по формуле [8]:

$$\omega = \frac{\lambda V_{\text{п}}}{R} \quad (6)$$

Мощность, производимая ротором, определяется произведением крутящего момента на угловую скорость. Это ключевой параметр, отражающий эффективность ротора в преобразовании энергии ветра в механическую [9]:

$$P = T_r \cdot \omega \quad (7)$$

Коэффициент мощности характеризует эффективность преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию ротора. Он рассчитывается как отношение выработанной мощности к максимальной возможной мощности воздушного потока, проходящего через площадь ротора. можно определить по формуле [10]:

$$C = \frac{P}{0.5 \cdot \rho V_n^3 A_{эфф}} \quad (8)$$

Для оценки деформации конструкции под действием нагрузки была использована формула [11]:

$$\Delta L = \frac{FL}{AE} \quad (9)$$

Здесь, F — приложенная сила, L — длина ротора, A — площадь поперечного сечения, E — модуль Юнга материала, который характеризует его жесткость.

Модель, реализованная в рамках данного исследования, была разработана с опорой на типовые конструктивные параметры роторов Дарье, ранее описанные в работах [1,2]. В этих источниках рассматриваются различные геометрии лопастей, условия обтекания, диапазоны скоростей воздушного потока и подходы к численному и экспериментальному моделированию. В процессе разработки численной модели особое внимание было уделено согласованию ключевых параметров (форма, высота, радиус, диапазон скоростей) с теми, что использовались в указанных публикациях. Такой подход позволил сформировать предпосылки для последующего сопоставления результатов, полученных в ходе текущей работы, с данными, имеющимися в литературе. Кроме того, методика моделирования в среде SolidWorks и используемые аналитические зависимости были выбраны таким образом, чтобы обеспечить совместимость с подходами, уже апробированными в научных публикациях, что также способствует корректной интерпретации результатов. В следующем разделе приведены полученные в ходе расчётов значения ключевых аэродинамических и прочностных характеристик, а также выполнен их качественный и количественный анализ в контексте ранее опубликованных исследований. Это позволяет оценить точность расчётной модели, а также обоснованность использованных допущений и методов.

Результаты и обсуждение.

Дарье ротор является одним из наиболее часто используемых типов роторов для ветровых турбин с вертикальной осью вращения, благодаря его способности эффективно преобразовывать энергию ветра в механическую мощность при высоких скоростях ветра. Основная задача данного исследования — рассчитать аэродинамические силы, действующие на ротор Дарье, оценить производимую им мощность, а также изучить поведение ротора при определенных параметрах. В рамках эксперимента используются формулы для расчета эффективной площади ротора, силы сопротивления, подъемной силы, момента силы и мощности, получаемой ротором. Были выбраны следующие параметры ротора: высота ротора $L=2\text{m}$, радиус ротора $R=0.5\text{m}$, скорость ветра $V_n=8\text{ м/с}$, $\rho=1.225\text{кг/м}^3$ [12], Коэффициент скорости для ротора Дарье $\lambda=1.8$, коэффициент подъемной силы $C \approx 0.12$, коэффициент сопротивления $C_c \approx 0.6$ [13]

Эффективный радиус лопасти по формуле 1 равен:

$$R_{эфф} = 0.95 \times 0.5 = 0.475 \text{ м}$$

Для криволинейной лопасти $R_{эфф} \approx 0.95R$, что уменьшает площадь взаимодействия лопасти с потоком воздуха и снижает сопротивление. Следовательно, в соответствии с формулой 2 эффективная ометаемая площадь ротора Дарье равна:

$$A_{эфф} = 2 \times H \times R_{эфф} = 2 \times 2 \times 0.475 = 1.9 \text{ м}^2$$

В соответствии с формулой 3 сила сопротивления равна:

$$F_a(\theta) = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.6 \cdot 1.9 \cdot 8^2 = 44,688 \text{ Н}$$

Сила подъема в соответствии с формулой 4 равна:

$$F_n(\theta) = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.12 \cdot 1.9 \cdot 64 = 8.938 \text{ Н}$$

Момент силы можно рассчитать, используя разность между силами сопротивления и подъема по формуле 5:

$$T_T = 0.5 \times (44.688 - 8.938) \times 0.475 = 8.491 \text{ Нм}$$

В соответствии с формулой 7 была рассчитана угловая скорость:

$$\omega = \frac{1.8 \cdot 8}{0.5} = 28.8 \text{ рад/с}$$

Используя угловую скорость ω , была рассчитана мощность по формуле 7:

$$P = 8.491 \times 28.8 = 244.53 \text{ Вт}$$

Коэффициент мощности для ротора Дарье для выбранных условий составляет:

$$C = \frac{244.53}{\frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 1.9 \cdot V_n^3} \quad (10)$$

На рисунке 1 представлена трехмерная модель ротора Дарье, созданная в программной среде SolidWorks. Лопасти выполнены в криволинейной форме, что способствует снижению аэродинамического сопротивления и повышению эффективности работы. Конструкция включает центральный вал и три лопасти, обеспечивающие оптимальное преобразование энергии воздушного потока в механическую мощность. Данная модель применялась для численного анализа, позволяющего исследовать поведение ротора при высоких скоростях ветра.

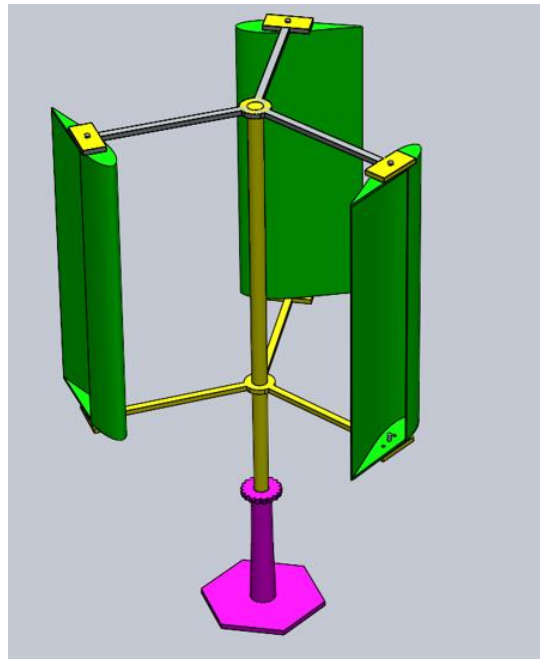


Рисунок 1 – 3Д модель ротора

На рисунке 2 приведён график нормализованных характеристик работы ротора Дарье, полученных в ходе численного моделирования, где одна итерация эквивалентна одной секунде. Процесс нормализации позволяет отследить динамику изменения параметров во времени в диапазоне от 0 до 1, что облегчает визуализацию момента стабилизации системы после определённого количества итераций. Синяя кривая отражает динамическое давление, которое возрастает на протяжении первых 30 итераций, достигает максимального значения, а затем выходит на стабильный уровень, равный 1, что свидетельствует о переходе ротора

в устойчивый режим работы. Фиолетовая линия отображает суммарное давление (статическое и динамическое), также демонстрирующее стабилизацию после 30 секунд. Этот параметр является ключевым для оценки аэродинамической нагрузки на конструкцию. Жёлтая линия характеризует уровень турбулентности, который возрастает в течение первых 30 секунд и достигает значения около 6%, что указывает на умеренную степень турбулентности в системе, положительно влияющую на эффективность работы ротора. Зелёные кривые показывают изменения вертикальной и общей скорости воздушного потока, которые, аналогично другим параметрам, выходят на стабильный уровень после первых 30 итераций, подтверждая установившийся режим работы. В целом, график демонстрирует, что основные рабочие характеристики ротора стабилизируются после 30 итераций, что свидетельствует о достижении устойчивого состояния системы.

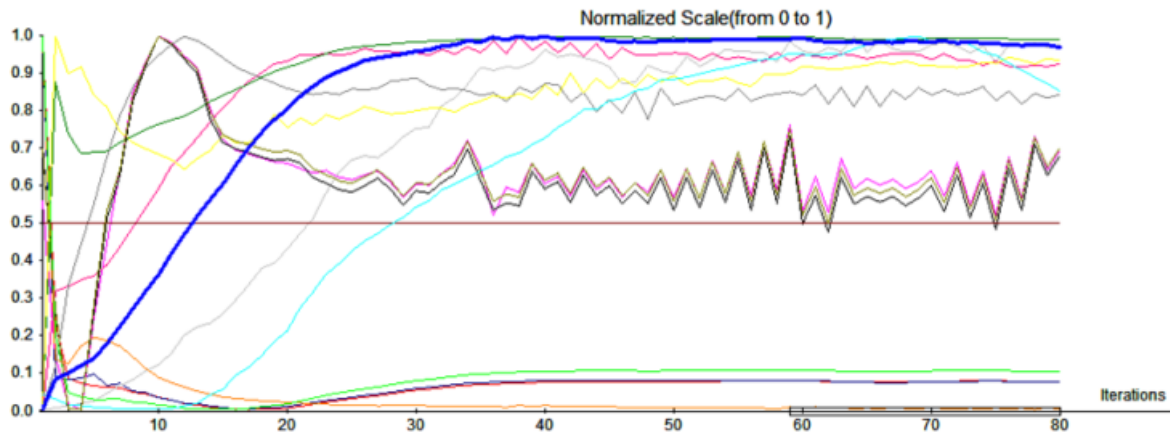


Рисунок 2 – Диаграмма нормализованных характеристик функционирования ротора Дарье

На рисунке 3 представлена таблица с основными параметрами работы ротора Дарье, полученными в результате численного моделирования. В неё включены как средние показатели, так и максимальные значения, зафиксированные в ходе расчётов. Основные параметры:

Среднее динамическое давление (GG Av Dynamic Pressure 1): составило 268.243 Па, отражая воздействие воздушного потока на лопасти ротора;

Среднее статическое давление (GG Av Static Pressure 1): стабильно на уровне 101370 Па, что соответствует атмосферному давлению и важно для оценки равномерности работы ротора;

Средняя вертикальная скорость (GG Av Velocity (Y) 1): достигла 20.165 м/с, демонстрируя характер движения воздушного потока относительно лопастей;

Максимальное динамическое давление (GG Max Dynamic Pressure 1): достигло 592.489 Па, что указывает на наибольшую нагрузку, испытываемую ротором;

Максимальная скорость воздушного потока (GG Max Velocity 1): составила 31.1 м/с, что является предельной скоростью, при которой ротор эффективно генерирует энергию.

Эти данные свидетельствуют о том, что ротор Дарье способен стабильно функционировать в условиях высоких скоростей ветра. Достижение устойчивых значений давления и скорости указывает на стабильное рабочее состояние системы и подтверждает способность конструкции выдерживать значительные аэродинамические нагрузки.

| Name | Current Value | Progress | Criterion | Averaged Value |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| GG Av Dynamic Pressure 1 | 267.971 Pa | Achieved (IT = 41) | 2.97306 Pa | 268.243 Pa |
| GG Av Heat Flux 1 | 0 W/m ² | Achieved (IT = 40) | 0 W/m ² | 0 W/m ² |
| GG Av Static Pressure 1 | 101370 Pa | Achieved (IT = 54) | 3.83442 Pa | 101370 Pa |
| GG Av Total Pressure 1 | 101638 Pa | Achieved (IT = 54) | 4.51555 Pa | 101639 Pa |
| GG Av Turbulence Intensity 1 | 7.10725 % | Achieved (IT = 53) | 0.571865 % | 7.07384 % |
| GG Av Velocity (Y) 1 | 20.1664 m/s | Achieved (IT = 80) | 0.00255442 m/s | 20.1659 m/s |
| GG Av Velocity (Z) 1 | 0.234487 m/s | Achieved (IT = 79) | 0.0297928 m/s | 0.262034 m/s |
| GG Av Velocity 1 | 20.3726 m/s | Achieved (IT = 40) | 0.0230425 m/s | 20.3754 m/s |
| GG Friction Force (Y) 1 | 9.3762 N | Achieved (IT = 42) | 0.204746 N | 9.38799 N |
| GG Max Dynamic Pressure 1 | 592.499 Pa | Achieved (IT = 40) | 34.3555 Pa | 568.328 Pa |
| GG Max Total Pressure 1 | 102188 Pa | Achieved (IT = 40) | 62.7313 Pa | 102194 Pa |
| GG Max Velocity (Y) 1 | 31.1091 m/s | Achieved (IT = 40) | 1.01021 m/s | 30.5578 m/s |
| GG Max Velocity (Z) 1 | 19.6333 m/s | Achieved (IT = 40) | 1.09542 m/s | 19.6183 m/s |
| GG Max Velocity 1 | 31.3689 m/s | Achieved (IT = 40) | 0.943034 m/s | 30.721 m/s |
| SG Av Total Pressure 1 | 101373 Pa | Achieved (IT = 53) | 5.12907 Pa | 101373 Pa |

Рисунок 3 – Таблица параметров при работе ротора Дарье

Был проведён эксперимент по численному моделированию деформации ротора Дарье для анализа его поведения при критической скорости ветра 25 м/с, что позволило определить прочностные характеристики конструкции и выявить области наибольших напряжений (рисунок 4). В процессе исследования рассматривался ротор с высотой 2 м и радиусом лопастей 0.5 м, оснащённый криволинейными лопастями. В качестве материала использовался алюминий с модулем Юнга $E = 69 \times 10^9$ Па, что позволило достоверно рассчитать напряжения в конструкции. Значение скорости воздушного потока 25 м/с было выбрано как предельное для данного типа роторов, при этом нагрузка на его поверхность рассчитывалась на основе параметров воздушного потока. Результаты моделирования показали, что максимальное смещение конструкции составило 0.630 мм в верхней части ротора. Этот показатель оказался значительно ниже по сравнению с более гибкими конструкциями, что свидетельствует о высокой устойчивости ротора Дарье к ветровым нагрузкам.

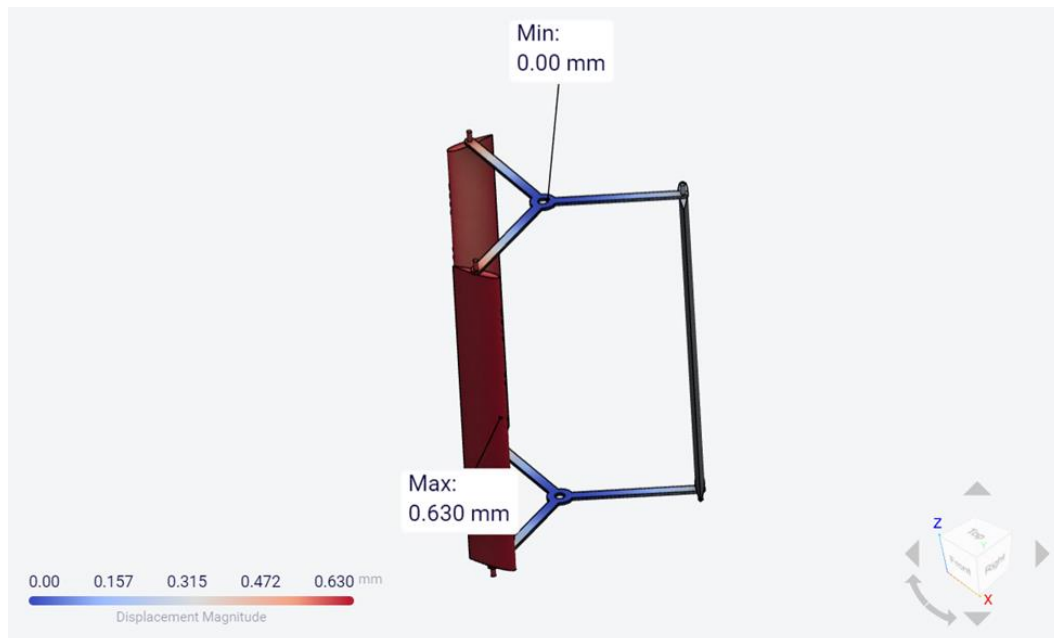


Рисунок 4 – Деформация ротора Дарье

Максимальное смещение, полученное в ходе эксперимента, $\Delta L = 0.630$ мм = 0.00063 м, может быть использовано для расчёта давления, воздействующего на ротор. Оценка давления производится с учётом модуля упругости материала, применяя уравнение деформации согласно формуле 9:

$$0.00063 = \frac{P \cdot 2}{69 \cdot 10^9} \quad (11)$$

Таким образом, давление равно:

$$P = \frac{0.00063 \cdot 69 \cdot 10^9}{2} = 21.735 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Численное моделирование деформации ротора Дарье при критической скорости ветра 25 м/с показало, что максимальное смещение конструкции в верхней части ротора составило 0.630 мм. Применение алюминия с модулем Юнга $E = 69 \times 10^9$ Па позволило провести оценку напряжений, возникающих в роторе. Расчёты продемонстрировали, что при заданных условиях давление на конструкцию достигает 21.735 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о высокой прочности ротора Дарье, его устойчивости к ветровым нагрузкам и способности минимизировать деформации, что способствует увеличению срока службы устройства в условиях реальной эксплуатации.

Полученные результаты были сопоставлены с данными, приведёнными в исследовании [14]. Так, расчётный коэффициент мощности, а также значения крутящего момента и аэродинамических нагрузок, полученные в рамках настоящей работы, находятся в пределах, характерных для аналогичных моделей роторов Дарье с криволинейными лопастями, представленных в указанных публикациях. В частности, работы [15] содержат численные и экспериментальные оценки, которые демонстрируют близкую динамику поведения ротора при аналогичных условиях воздушного потока. Это подтверждает адекватность использованной численной модели и применённых допущений.

Кроме того, характер установления устойчивого режима, отражённый на рисунке 2, качественно соответствует временным характеристикам, описанным в работах [16] и [17], что позволяет говорить о воспроизводимости ключевых закономерностей.

Тем не менее, необходимо отметить ряд ограничений, присущих данной модели. Во-первых, численное моделирование проводилось при условии ламинарного обтекания ротора и постоянной скорости воздушного потока, что не в полной мере отражает реальные атмосферные условия, включая турбулентность, порывы ветра и влияние окружающих объектов. Во-вторых, прочностной анализ конструкции базировался на упрощённой геометрии и линейной модели деформаций, что может не учитывать локальные концентрации напряжений и колебательные процессы. В-третьих, расчёты проводились в стационарной постановке, без учёта циклических нагрузок и усталостных характеристик материалов, что ограничивает возможность экстраполяции результатов на длительный период эксплуатации.

Указанные ограничения следует учитывать при интерпретации результатов, а также при планировании дальнейших исследований, направленных на расширение применимости модели и повышение её прогностической точности.

Заключение.

В данной работе проведено теоретическое и численное моделирование ротора Дарье, одного из наиболее эффективных типов роторов для ветровых турбин с вертикальной осью вращения. Исследование включало анализ аэродинамических характеристик ротора, таких как сила сопротивления, подъёмная сила, крутящий момент, угловая скорость и мощность. Используемые аналитические методы и численное моделирование в среде SolidWorks позволили детально оценить поведение ротора при различных параметрах воздушного потока. Результаты численного моделирования подтвердили, что ротор Дарье способен эффективно преобразовывать энергию ветра в механическую мощность, особенно при высоких скоростях воздушного потока. Графики нормализованных параметров показали, что система достигает устойчивого режима работы после 30 итераций, а основные аэродинамические характеристики стабилизируются. Проведённый анализ напряжений и деформаций конструкции ротора при критической скорости ветра 25 м/с продемонстрировал его высокую механическую прочность. Максимальное смещение в верхней части ротора составило 0.630 мм, что подтверждает устойчивость конструкции

даже при значительных аэродинамических нагрузках. Расчёты давления и механической нагрузки показали, что ротор выдерживает воздействие потока воздуха без значительных деформаций, что обеспечивает его долговечность и надёжность в эксплуатации. Таким образом, полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего проектирования и оптимизации ветроэнергетических установок с ротором Дарье, позволяя повысить их эффективность и структурную устойчивость.

Проведённое исследование создаёт основу для дальнейшего совершенствования конструкции роторов Дарье. В будущем планируется расширить модель за счёт учёта нестационарных ветровых условий, турбулентности, усталостных характеристик материала и влияния температуры окружающей среды. Также представляется перспективным использование оптимизационных алгоритмов для улучшения аэродинамической формы лопастей и внедрение адаптивных конструктивных элементов, способных изменять геометрию в зависимости от условий эксплуатации.

Информация о финансировании

Результаты исследований проведены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта «АР23489937 Разработка механической саморегулирующейся коробки передач для военно-транспортной техники».

Список источников

1. Mohan M., Saha U. K. «Evolving a Novel Blade Shape of a Savonius Wind Rotor Using an Optimization Technique Coupled With Numerical Simulations and Wind Tunnel Tests», *Journal of Energy Resources Technology*. – 2024. – Т. 146. – № 4. – С. 041301.
2. Banerjee A., Roy S., Mukherjee P., Saha U. K. «Unsteady Flow Analysis Around an Elliptic-Bladed Savonius-Style Wind Turbine», *Proceedings of the ASME Gas Turbine India Conference*. – 2019. – С. V001T06A003.
3. Sharma S., Sharma R. K. «Performance Improvement of Savonius Rotor Using Multiple Quarter Blades – A CFD Investigation», *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Т. 127. – С. 43–54.
4. Roy S., Mukherjee P., Saha U. K. «Aerodynamic Performance Evaluation of a Novel Savonius-Style Wind Turbine under an Oriented Jet», *Proceedings of the ASME Gas Turbine India Conference*. – 2023. – С. V001T06A004.
5. Acarer S., Uyulan Ç., Karadeniz Z. H. «Optimization of Radial Inflow Wind Turbines for Urban Wind Energy Harvesting», *Energy*. – 2020. – Т. 202. – С. 117772.
6. Grinspan A. S., Saha U. K., Mahanta P. «Experimental Investigation of Twisted Bladed Savonius Wind Turbine Rotor», *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*. – 2018. – С. 1–6.
7. Pyankov K. S., Toporkov M. N. «Mathematical modeling of flows in wind turbines with a vertical axis», *Fluid Dynamics*. – 2014. – Т. 49. – № 2. – С. 249–258 pp.
8. Zhang S., Lee K. «Dynamic Blade Adjustment Mechanisms for Vertical Axis Wind Turbines», *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Т. 54. – С. 89–101 pp.
9. Brown D. S. «The Role of Aerodynamic Resistance in Wind Energy Conversion», *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2023. – Т. 31. – № 2. – С. 210–221 pp.
10. Patel G., Novak E. «Advanced Control Strategies for Variable-Speed Wind Turbines», *Wind Engineering Review*. – 2021. – Т. 22. – № 4. – С. 178–192 pp.
11. Schmidt B., Zhao L. «Analysis of P-, I-, and D-Controllers in Wind Energy Applications», *Control Systems Review*. – 2022. – Т. 27. – № 3. – С. 98–115 pp.
12. Yamada S. «Modeling of Wind Force in Energy Systems», *Journal of Theoretical Mechanics*. – 2022. – Т. 45. – № 3. – С. 101–115 pp.
13. Aliyev M., Kadyrov A. «Wind Energy Resource Mapping in Kazakhstan», *Renewable Energy*. – 2022. – Т. 35. – № 4. – С. 451–465 pp.

14. Isataev, M.; Manatbayev, R.; Seydulla, Z.; Kalassov, N.; Yershina, A.; Baizhuma, Z. Experimental and Computational Study of the Aerodynamic Characteristics of a Darrieus Rotor with Asymmetrical Blades to Increase Turbine Efficiency Under Low Wind Velocity Conditions. Appl. Syst. Innov. 2025, 8, 49. <https://doi.org/10.3390/asi8020049>

15. Chen, W.-H.; Lam, T.T.; Chang, M.-H.; Jin, L.; Chueh, C.-C.; Augusto, G.L. Optimizing H-Darrieus Wind Turbine Performance with Double-Deflector Design. Energies 2024, 17, 503. <https://doi.org/10.3390/en17020503>

16. Elbeji, T.; Ben Amira, W.; Souaissa, K.; Ghiss, M.; Bentaher, H.; Ben Fredj, N. Three-Dimensional Aeroelastic Investigation of a Novel Convex Bladed H-Darrieus Wind Turbine Based on a Two-Way Coupled Computational Fluid Dynamics and Finite Element Analysis Approach. Fluids 2025, 10, 17. <https://doi.org/10.3390/fluids10010017>

ДАРЬЕ РОТОРЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада тік айналу осі бар жел турбиналары үшін ең танымал роторлардың бірі – Дарье роторының теориялық және сандық модельдеуі берілген. Ротордың тиімді ауданын, қарсылық күшін, көтеру күшін, айналу моментін және қуатты қоса алғанда, аэродинамикалық сипаттамалардың есептеулері жүргізілді. Ауа ағынының әртүрлі параметрлерінде ротордың жұмысын бағалау үшін SolidWorks ортасында аналитикалық әдістер мен сандық модельдеу қолданылды. Сондай-ақ, сыни жүктемелер кезінде құрылымның деформациясын талдау жүргізілді, бұл оның тұрақтылығы мен тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Нәтижелер Дарье роторының желдің жоғары жылдамдығында тұрақты жұмыс істеу қабілетін және оның жоғары механикалық беріктігін растайды.

Түйін сөздер: Дарье роторы, сандық модельдеу, аэродинамикалық өнімділік, жел турбинасы, деформациялық талдау.

THEORETICAL AND NUMERICAL MODELING OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS AND MECHANICAL STABILITY OF THE DARRIER ROTOR

Аннотация. This article presents a theoretical and numerical simulation of the Darrier rotor, one of the most popular rotors for wind turbines with a vertical axis of rotation. Calculations of aerodynamic characteristics, including the effective area of the rotor, drag force, lifting force, torque and power are carried out. Analytical methods and numerical modeling in the SolidWorks environment were used to evaluate the operation of the rotor at various air flow parameters. An analysis of the deformation of the structure under critical loads was also performed, which made it possible to assess its stability and efficiency. The results obtained confirm the Darrier rotor's ability to operate stably at high wind speeds and its high mechanical strength.

Keywords: Darrier rotor, numerical modeling, aerodynamic characteristics, wind turbine, deformation analysis.

Авторлар туралы мәлімет

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фазылова Алина | Электрондық инженерия кафедрасының аға оқытушысы, PhD, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.fazylova@aes.kz |
| Қуаныш Алипбаев | Ғылыми жұмыс жөніндегі проректор, PhD, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы e-mail: k.alipbayev@aes.kz |
| Арай Оразалиева | Кіші ғылыми қызметкер, PhD докторант, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы e-mail: a.orazaliyeva@aes.kz |
| Әлішер Әден, | Ғылыми қызметкер, PhD докторант, Алматы энергетика және байланыс университеті. Ғұмарбек Дәукеев, Алматы, Қазақстан Республикасы e-mail: a.aden@aes.kz |

Сведение об авторах

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фазылова Алина | Старший преподаватель кафедры «Электронная инженерия», PhD, Алматинский Университет Энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Республика Казахстан, e-mail: a.fazylova@aes.kz |
| Қуаныш Алипбаев | Проректор по научной работе, PhD, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан, e-mail: k.alipbayev@aes.kz |
| Арай Оразалиева | младший научный сотрудник, докторант PhD, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Республика Казахстан e-mail: a.orazaliyeva@aes.kz |
| Алишер Аден | Научный сотрудник, PhD докторант, Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева, Алматы, Республика Казахстан e-mail: a.aden@aes.kz |

Information about the authors

| | |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alina Fazylova, | Senior Lecturer at the Department of Electronic Engineering, PhD, Gumarbek Daukeev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.fazylova@aes.kz |
| Kuanysh Alipbayev | Vice-Rector of Science, PhD, The Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan e-mail: k.alipbayev@aes.kz |
| Aray Orazaliyeva | Junior researcher, PhD candidate, The Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan e-mail: a.orazaliyeva@aes.kz |
| Alisher Aden | Researcher, PhD candidate, The Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan e-mail: a.aden@aes.kz |