



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОТУРБИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Хамдамов М.М., Сайидов Ф.Х.

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени
М.Т.Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.*

E-mail: mmhamdamov@mail.ru

Аннотация. В работе выполнено моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) с использованием ANSYS Fluent, эта работа изучает динамику лопастей ветроэнергетической установки с учетом аэродинамического поведения лопастей ротора, а также устойчивости потока. Трудность возникает из-за невозможности одновременного решения уравнений механики жидкости, описания потока и структурной динамики. Поэтому используется численный подход с использованием как численных моделей, разработанных с помощью программного обеспечения ANSYS.

Ключевые слова. скорости ветра, электроэнергии, вектор скорости вращения, турбулентности, моделировании

В последние годы в Республике Узбекистан принят комплекс мер, направленных на дальнейшее повышение эффективности использования электрической энергии в отраслях экономики и в быту, широкое внедрение энергосберегающих технологий и развитие возобновляемых источников энергии источники энергии.

За последние 50 лет 85% выработки электроэнергии в республике приходится на природный газ. Углекислый газ и оксиды углерода, выделяющиеся в результате сжигания углеводородов, приводят к загрязнению атмосферы, снижению ее прозрачности и увеличению мутности. Это, в свою очередь, усиливает «парниковый эффект», который за последние сто лет повысил среднюю температуру атмосферы Земли на 1,5-2 градуса. Такое



глобальное изменение климата приводит к таянию ледников северного и южного полюсов Земли, частому формированию аномальных климатических явлений. В конечном итоге это отражается на глобальном экологическом состоянии планеты и развитии цивилизации. В связи с этим на сегодняшний день становится актуальным широкое использование альтернативных источников электроэнергии [1].

Из альтернативных источников электроэнергии самым дешевым и экологически безопасным является движущая сила ветра, обладающая высоким экономическим показателем. Исходя из этих соображений, мы разработали прототип ветродвигателя с вертикальной осью, который может работать при малых скоростях ветра и который может быть установлен во многих регионах страны.

В целом к 2030 году в Узбекистане прогнозируется развитие суммарной ветроэнергетической мощности до 5000 МВт [2].

Все это о большой энергии. Правительство также поддерживает малую энергетику. Свидетельством такого суждения, в частности, является финансирование данного проекта, который направлен на разработку и внедрение ветроустановок с вертикальной осью вращения.

Показаны особенности полярных течений для нижних слоев (до 15-27 км) атмосферы. Согласно второму закону Ньютона ускорение массы 1 м^3 воздух с плотностью ρ равна сумме всех сил, действующих на эту массу:

$$\rho \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{G} + \vec{K} + \vec{R} + \vec{P}. \quad (1)$$

где $\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ – вектор скорости ветра в зависимости от времени и декартовых координат;

$\vec{G} = -\frac{\partial p}{\partial x}\vec{i} - \frac{\partial p}{\partial y}\vec{j} - \frac{\partial p}{\partial z}\vec{k}$ – результирующая сила градиента давления; $\vec{i}, \vec{j}$ – единичные векторы (орты) в горизонтальных координатах x, y ; $\vec{k}$ – единичный вектор в вертикальной координате z ;

$$\begin{aligned}\dot{\vec{K}} &= 2\rho(\omega_z v - \omega_y w)\dot{\vec{i}} + 2\rho(\omega_x w - \omega_z u)\dot{\vec{j}} + 2\rho(\omega_y u - \omega_x v)\dot{\vec{k}} = \\ &= K_x \dot{\vec{i}} + K_y \dot{\vec{j}} + K_z \dot{\vec{k}} -\end{aligned}$$

(2)

сила, отклоняющая вектор скорости вращения Земли, есть сила Кориолиса, определяемая как $\dot{\vec{K}} = 2\rho(\dot{\vec{U}} \times \dot{\vec{\omega}})$; $\dot{\vec{\omega}} = \omega_x \dot{\vec{i}} + \omega_y \dot{\vec{j}} + \omega_z \dot{\vec{k}}$ – вектор скорости вращения Земли вокруг своей оси, направленный от южного полюса к северному полюсу;

$$\dot{\vec{R}} = \frac{\partial}{\partial z}(\eta + A) \frac{\partial u}{\partial z} \dot{\vec{i}} + \frac{\partial}{\partial z}(\eta + A) \frac{\partial v}{\partial z} \dot{\vec{j}} + \frac{\partial}{\partial z}(\eta + A) \frac{\partial w}{\partial z} \dot{\vec{k}} \quad (3)$$

– равнодействующая всех молекулярных напряжений η и турбулентная сила трения A ;

$$\dot{\vec{P}} = \rho g \dot{\vec{k}} \text{ – сила тяжести;}$$

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{\vec{U}}}{dt} &= \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dot{\vec{i}} + \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dot{\vec{j}} + \\ &+ \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \dot{\vec{k}} -\end{aligned}$$

(4)

субстационарная производная вектора скорости, учитывающая изменчивость вектора скорости по координатам: первые члены в скобках – локальные компоненты вектора ускорения, следующие три – конвективные компоненты вектора ускорения.

При этом, если направление ветра соответствует направлению оси, то составляющая силы Кориолиса направлена вправо в северном полушарии и влево в южном полушарии Земли, т.е. $\angle(\dot{\vec{U}}, \dot{\vec{K}}_s) = 90^\circ$ – угол между вектором скорости и силой Кориолиса равен 90° .

Таким образом, в упрощенном варианте расчета уравнения (1) записываются относительно ускорения воздушных масс и принимают вид

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\rho\omega_z v + \frac{\partial}{\partial z}(\nu + k) \frac{\partial u}{\partial z}, \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\rho\omega_z u + \frac{\partial}{\partial z}(\nu + k) \frac{\partial v}{\partial z}, \\ -\frac{\partial p}{\partial z} = g\rho, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

где ν, k – кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости.

На высотах 50-1500 (100-1500) метров турбулентная динамическая вязкость в сотни и тысячи раз превышает молекулярную вязкость. А на высотах более 1500 метров (свободная атмосфера) роль трения незначительна, так как величина вертикального градиента скорости невелика, а движение атмосферы определяется силой давления, силой Кориолиса и центробежной силой.

Многочисленные результаты теоретических испытаний ветряных турбин были получены в программном пакете ANSYS Fluent. Есть работы, выполненные в MATLAB [4] и других пакетах программ. В инженерии используется множество коммерческих программных продуктов для CFD, таких как PHOENICS (это первое коммерческое программное обеспечение для CFD), STAR-CD, ANSYS FLUENT/CFX и так далее. Все программные продукты CFD имеют три основные структуры: препроцессор, решатель и постпроцессор. Но суть решения задач аэродинамики во всех случаях состоит в ответе на вопрос: какие аэродинамические силы образуются при решении внешней задачи. В работе рассмотрен вариант задачи моделирования обтекания развитого ветродвигателя.

Геометрия. Построение модели CAD рис. 1. выполнялась в среде SolidWorks, где задавались основные геометрические размеры. Так как задача сводится к моделированию плоской задачи, был выбран режим 2D проектирования.

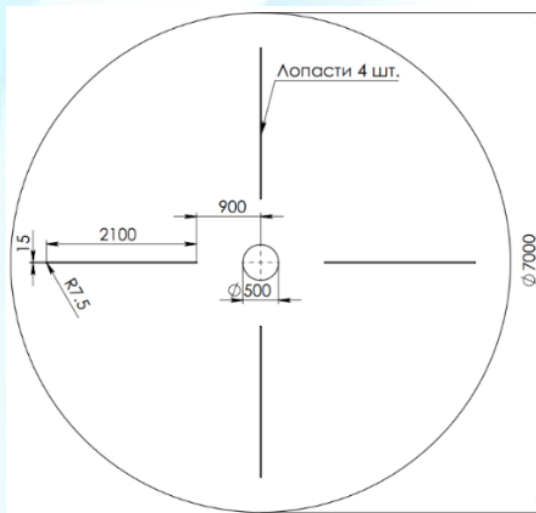


Рис. 1. Двухмерная геометрия ветряной турбины (вид сверху)

В процессе решения задачи для описания турбулентности можно использовать пять моделей турбулентности. Модель изменена $k-\varepsilon$. В отличие от известных работ здесь предлагается для описания турбулентного обмена использовать модифицированную $k-\varepsilon$ модель, которая способствует более адекватному описанию процесса тепломассопереноса:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - 2 \rho \varepsilon M_t^2 + S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon. \end{cases}$$

Здесь мы используем обозначение

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}},$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \frac{\rho \varepsilon}{2 \mu_t}}, \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \quad \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S_{ij}^2},$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t \partial T}{\rho \Pr_t \partial x_i}, \quad \Pr_t = 1/a_t,$$

$$a_0 = 1/\Pr = k/\mu c_p, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, \quad a = \sqrt{\gamma R T}.$$

Эмпирические константы $k-\varepsilon$ модели [4,5] принимать стандартные значения: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $A_0 = 4.04$.

Расчетная сетка. Затем модель CAD была экспортирована в Cadence Pointwise для создания гибридной сетки конечного объема (рис. 2). Тип топологии О-сетки был выбран для определения области потока CFD. Граничное условие входной скорости задавалось в I первой четверти круговой области, а в остальных частях - выходное условие атмосферного давления. Кроме того, ячеистые слои были разрешены непосредственно на стенках лопатки для точного моделирования турбулентного вязкого слоя, где $Y^+ < 4$.

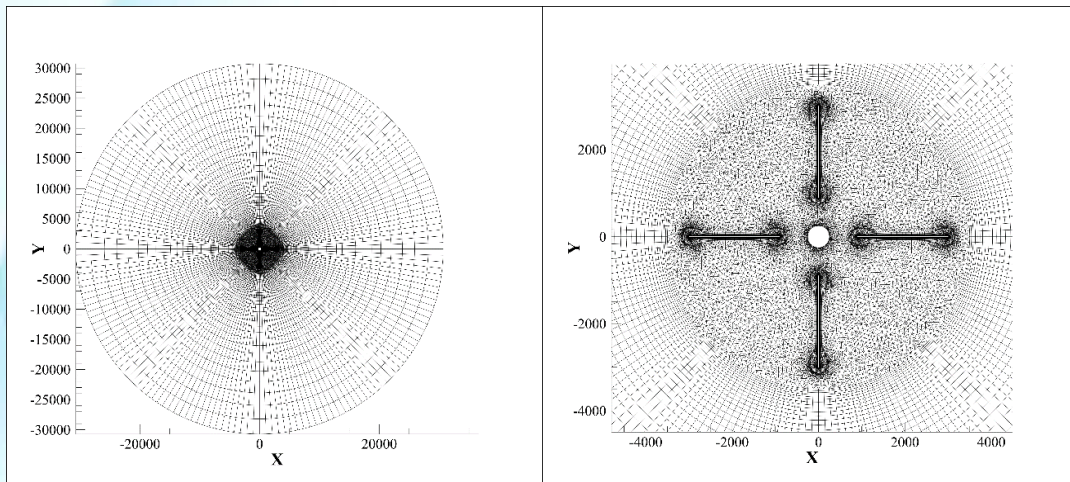


Рис. 2. Неструктурированная расчетная сетка конечных объемов.

Тип - нестационарное течение несжимаемой жидкости в двумерной постановке. Масса установки 68 кг, момент инерции по оси Z 85 кг·м².

Результаты моделирования вращения лопастей ветроустановки показали скорость 20-25 об/мин при скорости ветра 5 м/с (см. рис. 3).

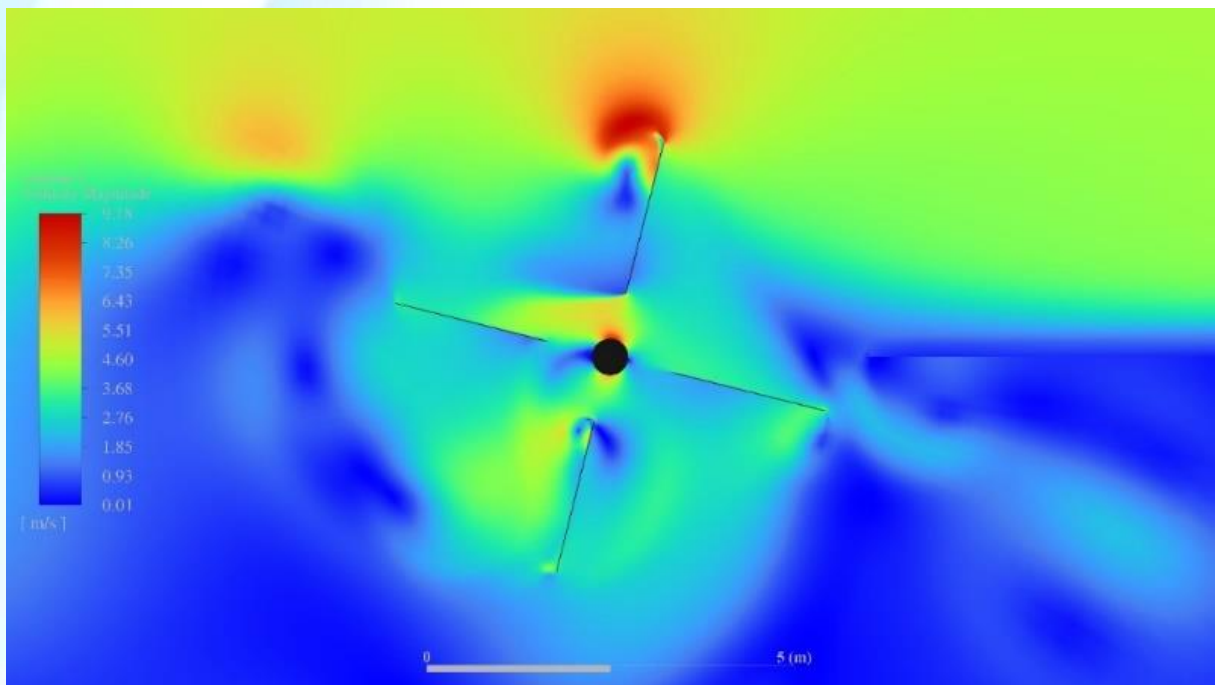


Рис. 3. Контур скорости $V=5$ м/с.

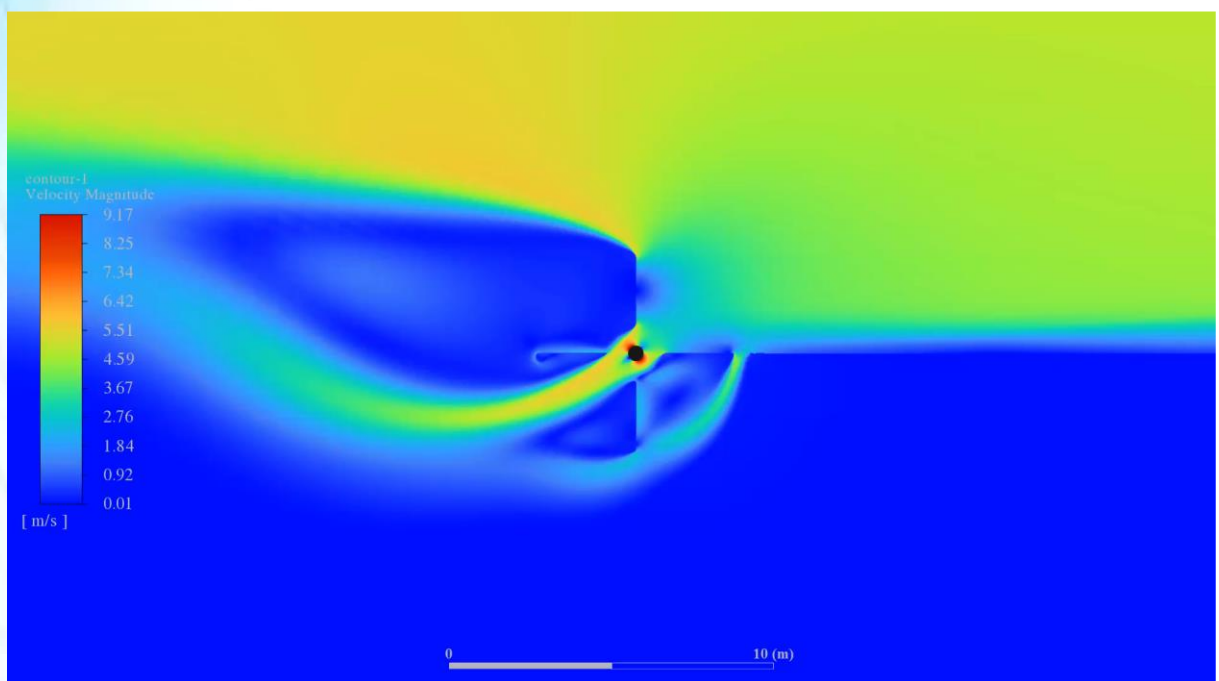


Рис. 4. Контур скорости $V=6$ м/с.

Изучены история и состояние использования энергии ветра в мире и отдельных странах. Суммарная мощность ВЭУ постепенно увеличивается. Выделены случаи ветрообразования земного масштаба и местных ветров.

В Республике Узбекистан ведутся работы по использованию энергии ветра. Начато строительство ветропарка Тамды и планируется строительство ветропарков в Бухарской области и Республике Каракалпакстан. Ведутся научно-практические работы по созданию и эксплуатации ВЭГ малой



мощности. Проанализированы существующие формы лопаток ВЭГ с вертикальной и горизонтальной осями вращения. Установлено, что ВЭГ с вертикальной осью вращения имеют возможность увеличения полезной рабочей площади и преимущества независимости от направления ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Wind Report 2019 | Global Wind Energy Council.
2. Wind energy in Europe in 2019 (англ.) // WindEurope. – 2020. – С. 18-19.
3. GWEC lauds 1.1 million workers in wind – GWEC.
4. Hamdamov M.M. Simulation and modeling of flow field around a horizontal axis wind turbine. ICISCT 2022 conference is technically sponsored by ieee and IEEE photonics society. 28th, 29th and 30th of september 2022, Tashkent, Uzbekistan
5. Hamdamov M.M., Ishnazarov A.I., Mamadaliev Kh.A. Numerical modeling of vertical axis wind turbines using Ansys Fluent software // NEW2AN 2022: the 22nd International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networks and Systems, Uzbekistan, <https://new2an.info>