ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 119 за 2019 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Бобков В.Г., Бондарев А.Е., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.

Численное исследование динамики вертикально-осевых ветротурбин

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Численное исследование динамики вертикально-осевых ветротурбин / В.Г.Бобков [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 119. 25 с. doi:10.20948/prepr-2019-119
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-119

О р д е н а   Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й   а к а д е м и и   н а у к

В.Г. Бобков, А.Е. Бондарев, В.Т. Жуков, К.В. Мануковский, Н.Д. Новикова, О.Б. Феодоритова

Численное исследование динамики вертикально-осевых ветротурбин

Москва – 2019

Бобков В.Г., Бондарев А.Е., В.Т. Жуков, Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.

Численное исследование динамики вертикально-осевых ветротурбин

Представлена вычислительная технология, предназначенная для выполнения параметрических исследований различных конфигураций вертикально-осевых ветроэнергетических установок на основе аэродинамических расчетов. Проведен анализ трехмерных аэродинамических течений, связанных с функционированием модельной ветротурбины. Численное моделирование турбины с тремя витыми лопастями выполнено при задании скорости ветра и угловой скорости вращения турбины в заданном диапазоне значений, а также при изменении геометрических размеров (ширины, длины и угла наклона лопасти), определяющих конструкцию турбины. Изучены квазистационарные периодические режимы установки, найдены условия оптимального вращения, получены оценки амплитуды пульсаций момента вращения ветротурбины в зависимости от задаваемых параметров.

Ключевые слова: вычислительная аэродинамика, ветровая турбина с вертикальной осью вращения, момент вращения

Vladimir Georgievich Bobkov, Alexander Evgenyevich Bondarev, Victor Timofeevich Zhukov, Konstantin Victorovich Manukovskii, Natalia Dmitrievna Novikova, Olga Borisovna Feodoritova

Numerical simulation of dynamics of vertical-axis wind turbines

Computing technology designed to perform parametric studies of various configurations of vertical-axis wind turbines based on aerodynamic calculations is presented. The analysis of 3D aerodynamic flows connecting with the functioning of models of wind turbines is carried out. Numerical simulation of a turbine with three twisted blades is performed by setting the wind speed and the angular speed of rotation of the turbine in a certain range of values, as well as by changing the geometric parameters (width, length and angle of inclination of the blade) that determine the design of the turbine. The quasi-stationary periodic modes of the turbine are studied, the conditions for optimal rotation are found, and estimates of torque pulsations are obtained depending on the specified parameters.

Key words: computational aerodynamics, vertical axis wind turbine, hydrodynamic torque

1. Введение

Среди возобновляемых источников энергии ветроэнергетика является одним из наиболее привлекательных из-за низкой стоимости обслуживания установленных систем. Несмотря на то что концепция вертикально-осевых ветровых турбин была предложена Дарье еще в 1931 году, исследования и разработки в этой области представляют интерес и в настоящее время.

Современный рост интереса к малым и большим вертикально-осевым ветроэнергетическим турбинам VAWTs (международная терминология – Vertical Axis Wind Turbines) определяется объективными причинами, среди которых можно указать следующие:

– простота конструкции;

– высокие энергетические характеристики;

– незначительный уровень вибрации и шумов.

К недостаткам VAWT обычно относят зависимость частоты вращения ветроколеса (ротора) от скорости ветра, неравномерность вращающего момента. Однако вертикально-осевые ветроколеса при любом направлении ветра находятся в рабочем положении из-за своей осесимметричной геометрии. Отсутствие зависимости эффективности их работы от направления ветра исключает необходимость в системах ориентации на ветер.

Среди нескольких категорий ветрогенераторов небольшие ветровые турбины наиболее хорошо адаптируются к городской среде с точки зрения визуального воздействия и шума. К настоящему времени среди установок VAWT конкурентами являются две различные геометрии: с прямыми лопастями, напоминающими крыло самолета, и витыми лопастями.

В данной работе, продолжающей серию расчетных исследований [1]–[5], рассматривается ветроколесо с витыми лопастями. Представленные здесь результаты трехмерных расчетов выполнены с помощью исследовательского кода NOISEtte [6], [7], являющего разработкой сектора аэроакустики ИПМ им. М.В.Келдыша, на гибридном вычислительном кластере К-60 [8].

Исследования аэродинамики и анализ современных наиболее эффективных вертикально-осевых ветроустановок в отечественной литературе представлены достаточно хорошо, но в основном с опорой на приближенные методы или эксперимент, см., например, [9]–[12].

В мире исследования аэродинамики вертикально-осевых ветроколес выходят на уровень трехмерного компьютерного моделирования на основе уравнений Навье-Стокса [13]–[19]. Такие исследования необходимы для оптимизации ветроустановки. Под оптимальной ветротурбиной понимается турбина с высокими энергетическими характеристиками, способная самостоятельно запускаться и вращаться вокруг своей вертикальной оси практически равномерно.

С математической и вычислительной точек зрения речь идет о решении класса задач динамики сплошной среды, представляющих определённые трудности, а именно, о моделировании низкоскоростных течений с числом Маха < 0.1.

Часто утверждается, что высокая точность численного моделирования не является обязательной для большинства инженерных приложений, так как ошибка 5–10% может быть приемлема, и методы высокой точности не являются необходимыми. Однако для ветротурбин численные погрешности могут привести к неверным выводам при оценке производительности турбин.

2. Примеры подходов к моделированию турбин

Численные исследования морских и ветровых турбин, как правило, следуют одной и той же схеме: для заданной скорости сплошной среды с помощью расчетов строятся графики зависимости вращающего момента (или безразмерного коэффициента момента, характеризующего мощность) от угловой скорости вращения турбины или от безразмерного параметра TSR (tip speed ratio), равного отношению линейной (концевой) скорости к скорости набегающего потока.

Не ставя цель дать полный обзор подходов к численному моделированию ветротурбин, приведем некоторые примеры. В [13] оценена точность численного моделирования турбины VAWT. В указанной работе авторы ограничились изучением простейшего двухлопастного ветроколеса, так называемого H-ротора с прямыми лопастями NACA0018, при умеренном значении параметра $TSR = 4.5$, т.е. турбина является достаточно быстрой – при диаметре $D = 1$ м вращение происходит с угловой скоростью 84 рад/с. Исследования основаны на 2-мерных и 2,5-мерных сеточных аппроксимациях нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) с SST-моделью турбулентности.

Следующий пример – приливная турбина (H-ротор с прямыми лопастями NACA0025), изученная численно и экспериментально, см. [18], причем расчетные и экспериментальные данные оказались хорошо согласованы. Трехмерные расчеты проведены с помощью пакета ANSYS-FLUENT с моделью турбулентности $k-\omega$ SST и основаны на выделении внутренней вращающейся подобласти, содержащей ~ 500 тысяч ячеек, тогда как во внешней неподвижной подобласти с десятикратным увеличением размера содержалось ~ 10 тысяч ячеек.

Прокомментируем результаты. На рис. 1 показана эволюция гидродинамического вращающего момента при отсутствии механического момента сопротивления. Точнее, показан безразмерный коэффициент C_M вращающего момента M, вычисляемый по формуле [18]

$$C_{\mathrm{M}} = \frac{\mathrm{M}}{\rho U^2 R^2 H}, \tag{1}$$

где ρ – плотность среды, U – скорость набегающего потока, R, H – радиус и высота ветроколеса соответственно. Видно, что в течение первой секунды происходит переходной режим с выходом на периодическое поведение. Среднее значение вращающего момента равно 0, так как нет механического момента сопротивления, а максимальное значение коэффициента C_{M} вращающего момента составляет примерно 0.1.

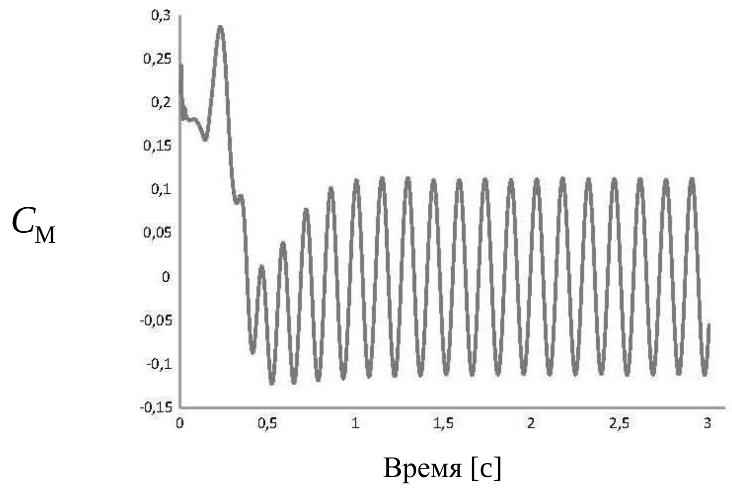

Рис. 1. Эволюция коэффициента вращающего момента $C_М$ [18]

На рис. 2 показана эволюция угловой скорости $\omega(t)$ турбины; начальная скорость $\omega(0)=0$ (состояние покоя). Отметим, что угловая скорость увеличивается очень быстро. Например, при скорости набегающего потока $U=1.62$ м/с угловая скорость менее чем за 0.5 с достигает максимального значения 19 рад/с, а в промежутке от 0.5 с до 1 с угловая скорость уменьшается и переходит в периодический режим. Средняя угловая скорость турбины для $U=1.62$ м/с составляет примерно 14.3 рад/с.

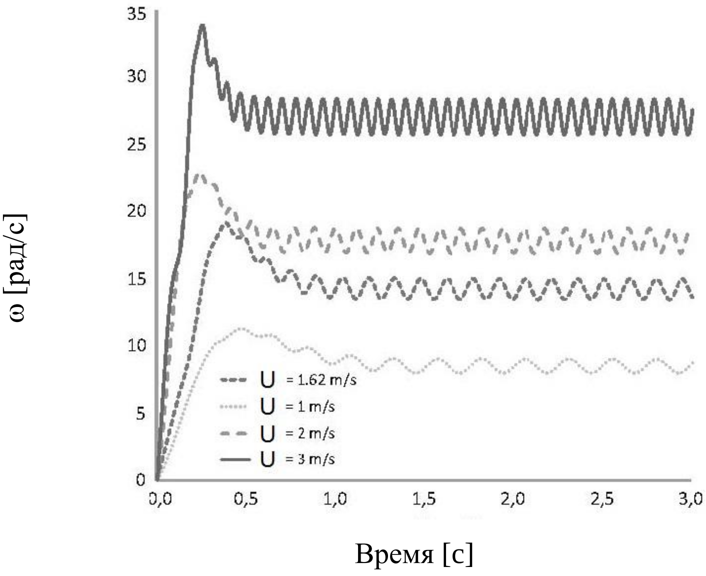

Рис. 2. Эволюция угловой скорости вращения
при скорости набегающего потока $U=1.62,\ 1,\ 2,\ 3$ м/с [18]

В [19] численно исследована установка VAWT мощностью 5 кВт. Изучены параметры конфигурации турбины, включающие положение крепления лопастей и угла крепления. На рис. 3 представлены для установившего периодического режима графики вращающего момента при фиксированном ветре 5 м/с и $TSR = 4$. На этом рисунке для трех конфигураций ротора (2, 3 и 4-лопастного) показана зависимость вращающего момента от угловой координаты – полярного угла φ в полярной системе координат плоскости вращения. Конфигурации двухлопастного, трехлопастного и четырехлопастного ротора имеют средний вращающий момент 4.8, 5.4 и 4.97 Нм соответственно. График вращающего момента двухлопастного ротора имеет участки отрицательных значений.

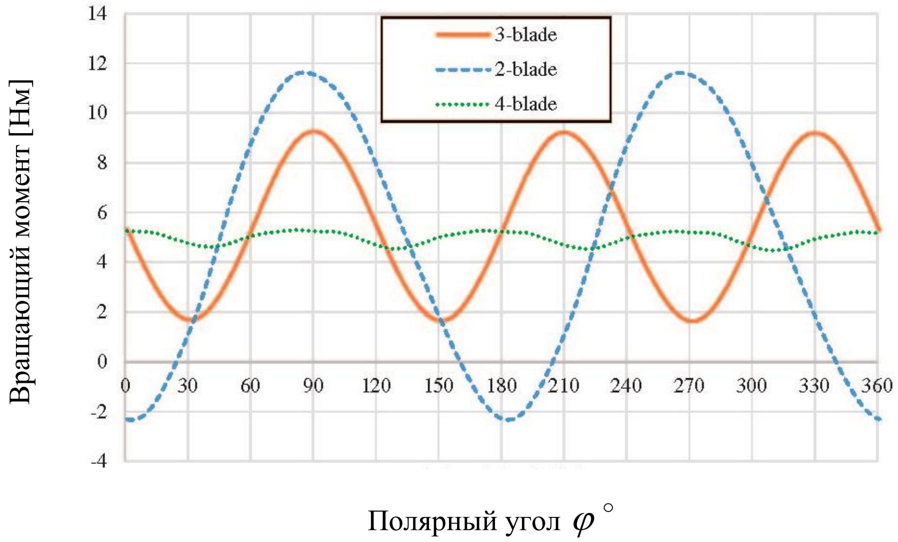

Рис. 3. Вращающий момент для 2, 3 и 4 –лопастного роторов при ветре 5 м/с и TSR=4 [19]

3. Постановка задачи численного моделирования

Мы рассматриваем достаточно тихоходную ветроустановку цилиндрической формы с тремя витыми лопастями. Геометрия ветроколеса в ее базовом варианте и профиль сечения лопасти произвольной горизонтальной плоскостью представлены на рисунке 4. Заметим, что лопасти имеют изогнутую форму и их средняя линия лежит на поверхности цилиндра.

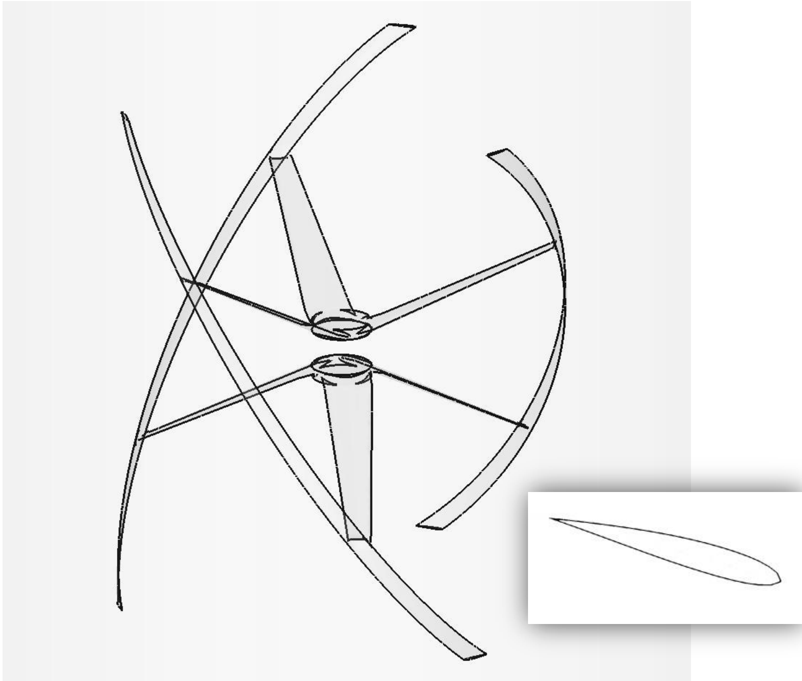

Рис. 4. Базовая геометрия ветроколеса

Условия расчетов типичны для численного моделирования турбин VAWT. В процессе предыдущих расчетных исследований [1]–[5] показано, что размер вычислительной области по сравнению с диаметром ветроколеса следует взять достаточно большим, чтобы исключить влияние граничных условий на решение. Нами проведено обоснование не только размера, но и структуры расчетной сетки, обеспечивающей разрешение основных характеристик течения. Для изучения характеристик установки с тремя витыми лопастями, оценки амплитуды и частоты пульсаций ветроколеса на этапе проектных изысканий мы провели серию расчетных исследований, продолживших развитие технологии компьютерного моделирования [1]–[5]. В указанных работах предполагалось, что ветроколесо является неподвижным. В новой серии расчетов, представленных здесь, ветроколесо не является неподвижным, а вращается с заданными угловой скоростью и скоростью внешнего набегающего потока, т.е. в общем случае нет естественного согласования скоростей турбины и ветра.

Многие ветротурбины VAWT имеют две проблемы: первая – довольно большая вариация момента вращения, а вторая заключается в том, что есть угловые позиции, в которых гидродинамический вращающий момент отрицательный или очень мал при наличии момента сопротивления. Мы проводим исследования модели в идеализированной постановке – в отсутствие момента сопротивления. В такой постановке интегральное значение гидродинамического вращающего момента за полный оборот равно нулю, следовательно, угловые позиции, где гидродинамический вращающий момент является отрицательным, обусловлены свойством модели, т.е. знакопеременность момента не носит негативный характер.

Согласованная постановка предполагает, что в математическую модель входит уравнение динамики ветроколеса в виде уравнения вращательного движения

$$J\frac{d\omega}{dt} = \mathrm{M} - \mathrm{M}_0 - k_f\,\omega, \tag{2}$$

где J – момент инерции ветроколеса; М – механический вращающий момент относительно вертикальной оси ветротурбины; M_0 – электромагнитный момент генератора; k_f – коэффициент трения; ω – угловая скорость ветроколеса. Механический момент ветроколеса зависит от частоты его вращения и скорости ветра $U(t,\vec{r})$, электромагнитный момент генератора M_0 определяется частотой его вращения и электрической нагрузкой. Для конструкции ветроустановки без редуктора частоты вращения ветроколеса и вала генератора одинаковы. Трением можно пренебречь, так как механические потери в ветроустановках обычно составляют несколько процентов от номинальной мощности.

Скорость ветра считаем постоянной по времени и направлению $\vec{r}$, $U(t,\vec{r}) = U$. Для системы без внешней нагрузки, т.е. в отсутствие электромагнитного момента генератора и в случае отсутствия трения, модельная согласованная задача состоит в решении уравнения

$$J\frac{d\omega}{dt} = \mathrm{M} \tag{3}$$

совместно с нестационарными уравнениями Навье-Стокса при нулевой начальной угловой скорости $\omega(0)=0$. Такая постановка может быть предметом будущих исследований.

В данной работе изучается другая модельная постановка – ветротурбина вращается с постоянной угловой скоростью при заданной скорости набегающего потока. Вращающий момент, возникающий за счет аэродинамических сил, может быть представлен периодической функцией времени $\mathrm{M}(t,U,\omega)=\mathrm{M}_{avr}(U,\omega)+\mathrm{M}_{ext}(U,\omega)\cdot\sin(3\omega t)$ с периодом $2\pi/3\omega$ в силу трехлопастной конструкции рассматриваемой ветротурбины, где $\mathrm{M}_{avr}(U,\omega)=(\mathrm{M}_{\max}(U,\omega)+\mathrm{M}_{\min}(U,\omega))/2$. Амплитуда $\mathrm{M}_{ext}(U,\omega)=$ $=(\mathrm{M}_{max}(U,\omega)-\mathrm{M}_{min}(U,\omega))/2$ зависит от скорости ветра и скорости вращения ветротурбины. Нас интересуют оптимальные режимы работы ветроколеса, т.е. режимы, при которых вращение происходит практически равномерно с небольшой амплитудой момента вращения.

Именно поэтому в приводимой в данной работе серии расчетов мы исследуем поведение во времени вращающего момента в зависимости от значений набегающего потока U и угловой скорости вращения турбины ω, а также оцениваем степень устойчивости вращающего момента по отношению к изменению геометрической формы ветротурбины. Изменение формы задается явно – на основе базовой геометрии строятся две новые геометрии, имеющие характер малых возмущений исходной формы.

Введем обозначение для трех моделей ветроколеса. Первая модель является базовой, она представлена на рис. 4. Всюду ниже будем называть ее «Модель 1». «Модель 2» получена из базовой увеличением ширины лопастей (на 20%) и их длины. На рис. 5 показаны геометрии первой и второй моделей в сравнении.

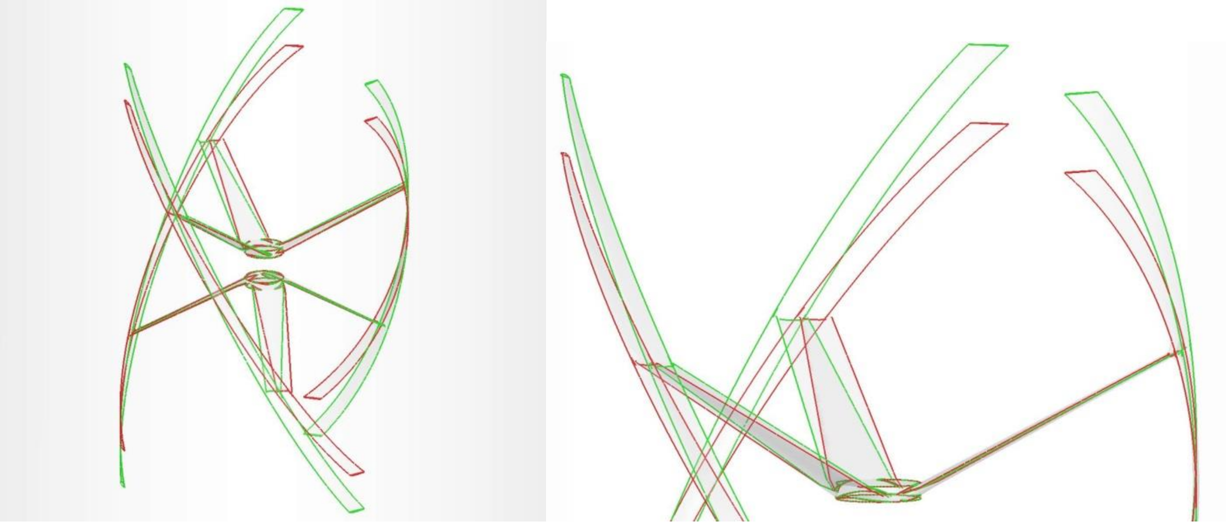

Рис.5. Сравнение формы моделей 1 и 2.
Модель 1 – красный цвет, Модель 2 – зеленый цвет

Третья модель (всюду ниже «Модель 3») получена из второй модели изменением положения держателей. Угол наклона лопасти у модели 2 относительно горизонтальной плоскости составляет 28^0, а у модели 3 - 18^0. Сравнение двух геометрий моделей 2 и 3 представлено на рисунке 6.

Заметим, что при всех изменениях средняя линия каждой лопасти продолжает оставаться на поверхности цилиндра радиуса R=2.1 м. Однако высота этого цилиндра меняется – для модели 1 она составляет 5 м, а для двух других моделей высота равна 6 м, т.е. она увеличена на 18%.

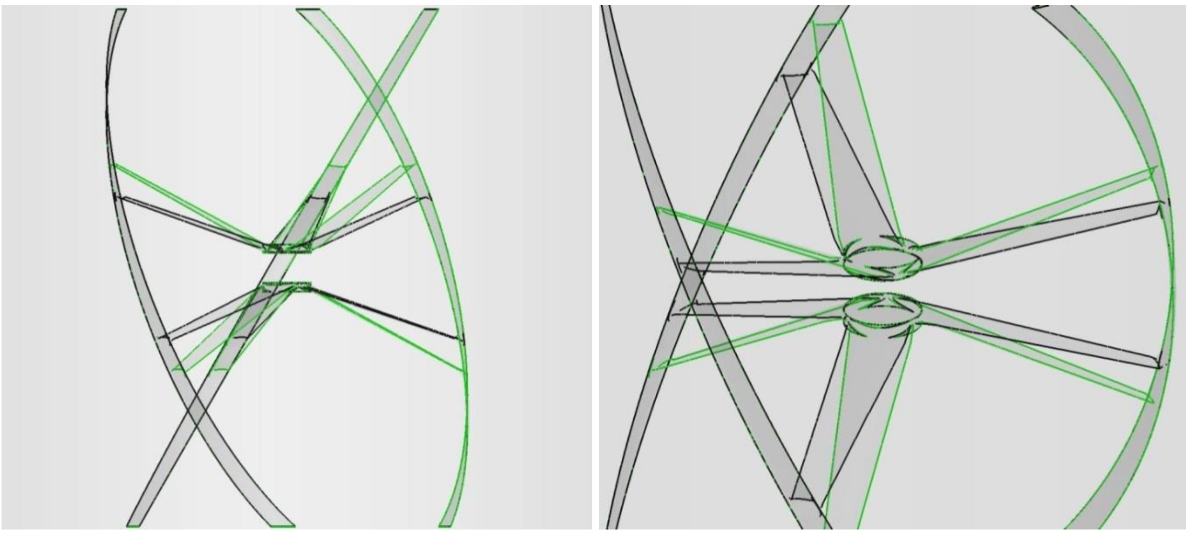

Рис.6. Сравнение геометрий моделей 2 и 3:
Модель 2 – зеленый цвет, Модель 3 – черный цвет

Для численного моделирования выбрана RANS-модель, замыкаемая эволюционным уравнением Спаларта–Алмараса (SA) для турбулентной вязкости [20]. Эта модель хорошо себя зарекомендовала при решении задач внешней аэродинамики, связанных с моделированием течений при отсутствии явлений существенного отрыва потока. Среди возможных подходов к расчету течений около вращающегося ротора на основе уравнений Навье–Стокса выбран подход, основанный на моделировании течения во всей расчетной области RANS-уравнениями, записанными в неинерциальной вращающейся системе координат. Система уравнений записывается в виде законов сохранения относительно 5-мерного вектора $(\rho,\ \rho u,\ E)^T$ и имеет вид [21]:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,\rho(u - \mathrm{V}) = 0\,,\\
&\frac{\partial \rho u}{\partial t} + Div\,\rho(u - \mathrm{V}) \otimes u \;+ grad\; p = div\;\tau - \rho(\omega \times u),\\
&\frac{\partial E}{\partial t} + div\;(u - \mathrm{V})E + div\;u\,p\; = div\,\mathrm{q} + div\;\tau u\,,
\end{aligned}
\tag{4}
$$

где u – вектор абсолютной скорости среды с компонентами $(u_1,\ u_2,\ u_3)$, V – вектор линейной скорости вращения, определяемый вектором угловой скорости ω как $\mathrm{V} = \omega \times \mathrm{r}$, ρ – плотность, p – давление, $E = \rho\left(e + 0.5u^2\right)$ – полная энергия, отнесенная к единице объема. Здесь и далее $u^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2$. $\mathrm{q} = \lambda \nabla T$ – вектора теплового потока, τ – тензор вязких напряжений с компонентами

$$
\tau_{ij} = \mu\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right],
$$

(по повторяющимся индексам производится суммирование), δ_{ij} – символ Кронекера, $i, j, k = 1,2,3$. Используется уравнение состояния идеального газа $p = e\rho(\gamma - 1) = \frac{\rho}{M}RT$, $e = e(T) = C_V T$ – удельная внутренняя энергия, γ – показатель адиабаты, M – молярная масса, R – газовая постоянная, T –

температура, C_V – теплоемкость при постоянном объеме. В общем случае коэффициент теплопроводности λ является тензором. Для частного случая молекулярной теплопроводности $\lambda = \mu C_p / \Pr$, где $\Pr$ – число Прандтля, а зависимости вязкости μ и теплоемкостей C_V , C_p от температуры известны: $\mu = \mu(T)$, $C_V = C_V(T)$, $C_p = C_p(T)$.

Система уравнений (4) в правой части содержит угловую скорость вращения $\omega = \omega(t)$. В общем случае система (4) дополняется уравнением (3) (или более общим уравнением (2)). Мы исследуем случай явного задания функции $\omega = \omega(t)$ постоянной из заданного набора значений.

В системе (4) операторы div и Div представляют собой операторы дивергенции векторной и тензорной величин, $\otimes$ – оператор диадного произведения векторов; результатами их применения являются скаляр, вектор и тензор соответственно.

Численное моделирование проводилось на основе исследовательского программного комплекса NOISEtte [6], [7]. Задача численного решения системы уравнений (4) с подходящими краевыми условиями представляет определённые трудности, так как речь идет о необходимости расчета низкоскоростных течений с числом Маха < 0.1; в коде NOISEtte расчет таких режимов предусмотрен.

Расчетные сетки для каждой из моделей несколько отличались: для модели 1 построена сетка объемом ~1.2 млн узлов, для модели 2 – ~1.6 млн узлов и для модели 3 – ~2 млн узлов (Сетка 1). Для модели 3 дополнительно построена сетка с удвоенным числом узлов ~4.3 млн узлов (Сетка 2). Это связано с тем обстоятельством, что модель 3 рассматривается впервые, в отличие от моделей 1 и 2, которые уже анализировались в предыдущих работах [1]–[5]. При измельчении сетки для модели 3 толщина пограничного слоя не менялась, но количество призматических слоев удваивалось.

Качество построенных сеток проверено как с помощью собственных диагностических программ комплекса NOISEtte, так и с помощью утилиты checkMesh, принадлежащей открытому пакету OpenFoam. При переходе от одной модели к другой ухудшения качества сеток не допускается. На рисунке 7 показан фрагмент расчетной сетки с пристеночным слоем для Модели 1. Шаг по времени в нестационарном случае отвечает вращению 0.5 градуса. Расчеты продолжались до 3–6 полных оборотов турбины.

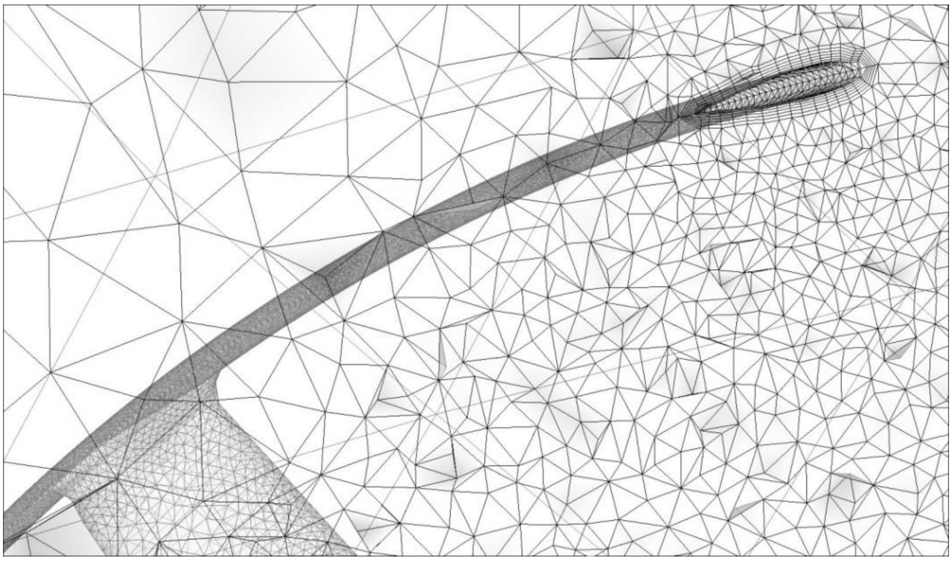

Рис. 7. Фрагмент расчетной сетки для модели 1

Все расчеты по решению задач математического моделирования обтекания ветроколеса проводились на гибридном вычислительном кластере К-60 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в режиме параллельных вычислений. Архитектуру этого кластера можно увидеть по ссылке [8].

4. Результаты расчетов

Расчетная область для численного моделирования устроена так, что узел лопастей находится в центре области на большом удалении от внешних границ для уменьшения влияния неопределенностей в постановке граничных условий на внешних границах расчетной области.

Выбранная форма расчетной области наследует геометрию ветроколеса и является цилиндрической (см. рис. 8).

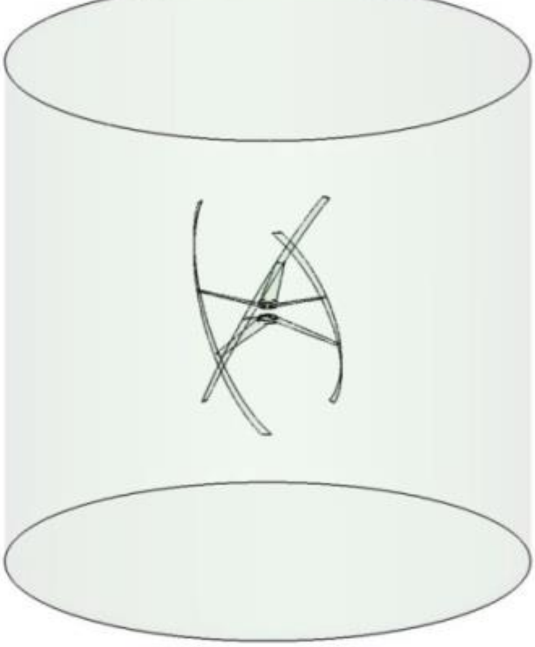

Рис. 8. Расчетная область для моделирования движущегося узла лопастей

Нас интересует вопрос, с какой угловой скоростью ω будет вращаться ветроколесо при заданной скорости набегающего потока U (без учета потерь). Такое вращение далее будем называть “оптимальным”. Для каждой геометрии ветроколеса получается своя зависимость оптимальной скорости вращения ω от скорости U.

Для того чтобы найти такое вращение или близкое к нему, будем помещать каждую из трех рассматриваемых турбин в однородный набегающий поток со скоростями $U = 5, 10, 15, 20$ м/с и вращать турбину с постоянными угловыми скоростями $\omega = 1, 3, 6, 9$ рад/с, что соответствует линейным скоростям лопастей $V = \omega R = 2.1,\ 6.3,\ 12.6, 18.9$ м/с. Таким образом, параметр $TSR = U/\omega R$ меняется в пределах 0.1 ÷ 3.78. Исследуемой функцией является вращающий момент $\mathrm{M}(U, \omega)$.

В самосогласованном случае линейная скорость лопастей не может значительно превышать скорость ветра. Это означает, что при вынужденном вращении, если линейная скорость ветроколеса больше скорости ветра, вращающий момент, отсчитываемый против часовой стрелки, положителен; в противном случае момент отрицателен.

Сравнительные результаты проведенных численных экспериментов для всех рассматриваемых моделей турбин сведены в таблицы 1 – 4. В каждой из них приведены максимальное M_{max}, минимальное M_{min} и среднее M_{avr} значения вращающего момента $M = M(U, \omega)$ при фиксированных скоростях вращения ω и скоростях набегающего потока U. Данные в таблице 1 соответствуют скорости вращения 1 рад/с; в таблице 2 – скорости 3 рад/с; в таблице 3 – скорости 6 рад/с и в таблице 4 – скорости 9 рад/с. Отрицательные величины среднего момента M_{avr} соответствуют режимам вращения с угловой скоростью ниже “оптимальной” при заданных скоростях набегающего потока. В таблице эти режимы выделены серым цветом.

Таблица 1

Вращающий момент $M(U, \omega) = M(U, 1)$

U	TSR	Модель 1			Модель 2			Модель 3		
		M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}
5	0.42	-2.1	-4.63	-3.3	-3.1	-6.92	-5.02	-3.9	-7.5	-5.7
10	0.21	-22.0	-31.0	-26.5	-29.90	-43.1	-36.5	-32.3	-45.1	-38.7
15	0.14	-59.4	-78.8	-69.1	-81.7	-107.4	-94.6	-86.5	-112.3	-99.4
20	0.11	-113.7	-148.2	-130.9	-158.5	-201.0	-179.9	-166.2	-209.7	-187.9

Таблица 2

Вращающий момент $M(U, \omega) = M(U, 3)$

U	TSR	Модель 1			Модель 2			Модель 3		
		M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}
5	1.26	12.9	9.8	11.4	15.7	10.24	13.0	14.4	9.0	11.7
10	0.63	5.1	-4.5	0.28	4.14	-12.5	-4.2	2.2	-14.4	-6.13
15	0.42	-16.8	-38.5	-27.6	-26.7	-62.7	-44.7	-30.4	-65.7	-48.1
20	0.32	-60.1	-96.4	-78.3	-85.1	-39.3	-12.2	-87.0	-146.9	-116.9

Согласно формуле (1) нулевой вращающий момент соответствует равномерному вращению с постоянной угловой скоростью. В силу геометрии исследуемого ветроколеса наличие трех лопастей приводит к отклонениям от равномерного вращения: ветроколесо в процессе вращения периодически немного ускоряется до максимальных значений и тормозится до минимальных величин вращающего момента. Построенной небольшой «базой данных» можно воспользоваться для определения оптимального вращения, отыскав на плоскости (U,ω) линию $\mathrm{M}_{avr}(U,\omega)=0$.

Таблица 3

Вращающий момент $\mathrm{M}(U,\omega)=\mathrm{M}(U,6)$

U	TSR	Модель 1			Модель 2			Модель 3		
		M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}
5	2.52	63.4	60.4	61.9	82.6	77.7	80.2	77.3	72.3	74.8
10	1.26	52.2	39.9	46.0	63.8	41.4	52.6	58.3	36.1	47.2
15	0.84	42.3	19.7	31.0	46.4	7.7	27.1	39.5	0.21	19.9
20	0.63	24.6	-17.3	3.7	19.5	-43.23	-11.9	5.4	-56.96	-25.8

Таблица 4

Вращающий момент $\mathrm{M}(U,\omega)=\mathrm{M}(U,9)$

U	TSR	Модель 1			Модель 2			Модель 3		
		M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}	M_{max}	M_{min}	M_{avr}
5	3.78	159.4	156.4	157.9	213.3	208.6	210.9	203.6	198.2	200.9
10	1.89	129.9	118.7	124.3	164.8	145.9	155.3	152.5	132.9	142.7
15	1.26	118.0	90.4	104.2	144.4	94.6	119.5	132.7	82.8	107.8
20	0.95	107.3	64.1	85.7	125.1	52.3	88.7	106.6	35.6	71.1

Построить линию нулевого момента вращения можно разными способами, используя подходящую интерполяционную процедуру. Для демонстрации предлагаемой технологии будем опираться на графический подход, который продемонстрируем на примере модели 1.

Ниже на рисунке 9 (слева) изображены поверхность среднего вращающего момента $\mathrm{M}=\mathrm{M}_{avr}(U,\omega)$ и линия пересечения этой поверхности с плоскостью M=0. На том же рисунке справа изображена проекция этой линии $\mathrm{M} = \mathrm{M}_{avr}(U, \omega) = 0$ на плоскость (U, ω). Построенная линия позволяет для каждого значения набегающего потока U^* найти угловую скорость ω^*(в отсутствие потерь), при которой ветроколесо вращается почти равномерно с незначительными ускорениями и торможениями, обусловленными конструкцией ветроколеса, а именно наличием трех лопастей.

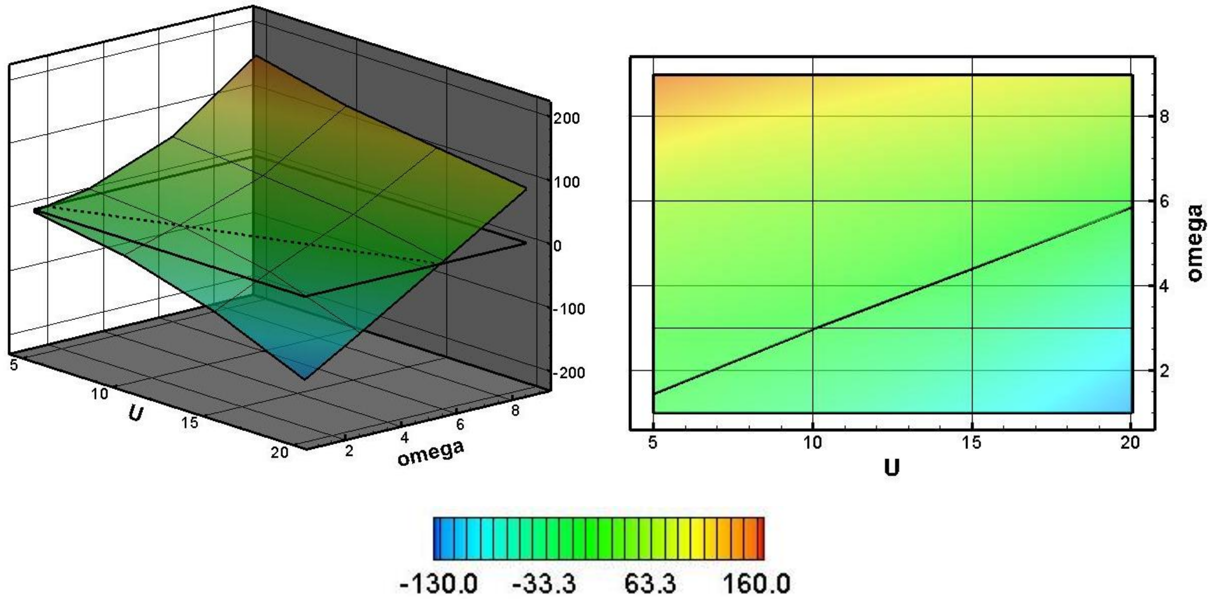

Рис. 9. Вращающий момент $\mathrm{M} = \mathrm{M}_{avr}(U, \omega)$, Модель 1

Опираясь на построенные линии, можно определить оптимальные скорости вращения и соответствующую амплитуду момента вращения при заданной скорости набегающего потока. Так, для модели 1 при скорости ветра *U*=5 м/с искомая скорость вращения равна ω=1.45 рад/с. Если скорость ветра *U*=10 м/с, то скорость вращения ω=2.98 рад/с и т.д.

Конструктивные изменения, вносимые в базовый вариант, приводят к увеличению скорости вращения при заданной скорости ветра в случае оптимального режима вращения. Это можно видеть из рис. 10, где приведены сравнительные графики линий нулевого момента в проекции на плоскость (U, ω) для всех трех вариантов геометрий узла лопастей (модели 1–3).

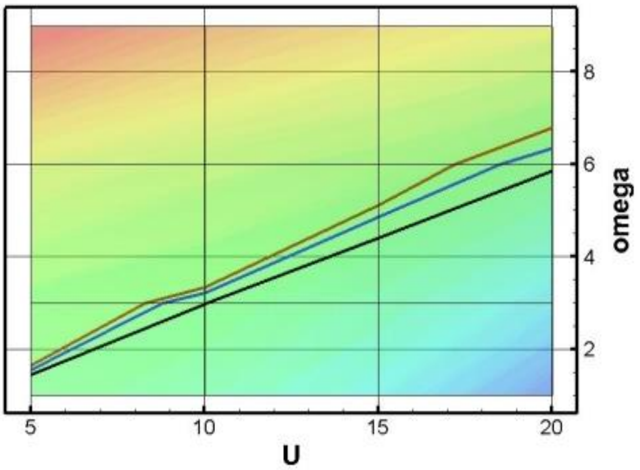

Рис. 10. Линия нулевого момента вращения на плоскости (U,ω): снизу вверх – черный, синий и красный цвета для моделей 1, 2, 3 соответственно

Для определения амплитуды момента вращения M_{ext} при выбранных значениях U и ω проводится расчет на основе уравнений Навье-Стокса по приведенной выше схеме. В таблице 5 для каждой из моделей показаны значения оптимальной скорости вращения ω, параметр TSR и амплитуда момента вращения M_{ext} для рассмотренного выше фиксированного набора скоростей набегающего потока $U = 5,\ 10,\ 15,\ 20$ м/с.

Таблица 5

Оптимальные режимы вращения для $U = 5,\ 10,\ 15,\ 20$ м/с

Модель 1			Модель 2			Модель 3		
(U,ω)	TSR	M_{ext}	(U,ω)	TSR	M_{ext}	(U,ω)	TSR	M_{ext}
(5, 1.45)	0.61	1.5	(5, 1.56)	0.66	2	(5, 1.65)	0.69	2
(10, 2.98)	0.63	5	(10, 3.22)	0.68	8	(10, 3.34)	0.70	7
(15, 4.41)	0.62	11	(15, 4.87)	0.68	18	(15, 5.12)	0.72	17
(20, 5.87)	0.62	21	(20, 6.35)	0.67	31	(20, 6.80)	0.71	30

Анализ таблицы показывает, что в оптимальном режиме зависимость амплитуды момента вращения от скорости ветра не является критичной, амплитуда с ростом скорости растет не слишком быстро. При построении линейной аппроксимации по табличным значениям методом наименьших квадратов для моделей 1, 2, 3 угловые коэффициенты линейной функции равны 1.3, 1.9, 1.9 соответственно. Видно, что в условиях оптимального вращения переход от модели 1 к моделям 2 и 3 приводит к незначительному росту TSR. Для нашего случая тихоходной турбины рост является положительным фактором. Это заключение основано на следующих эвристических рассуждениях. Если ветровая турбина вращается слишком медленно, то большая часть ветра проходит через зазор между лопастями, не отдавая своей энергии. В противном случае, если ротор вращается слишком быстро, то лопасти могут создавать нестационарные турбулентные потоки. Если при вращении очередная лопасть слишком быстро достигнет созданного предыдущей лопастью турбулентного потока, то она ударит по этому потоку. Эти рассуждения, конечно, требуют подтверждения на основе экспериментальных и расчетных исследований. Такие работы широко ведутся, см. [19], [20] и цитированную там обширную библиографию. Анализ публикаций показывает, что предположение от том, что с точки зрения эффективного использования энергии ветра для каждой конструкции существует оптимальное значение параметра TSR, является практически обоснованным.

Остановимся немного подробнее на модели 3. На рис. 11 показаны графики квазистационарных периодических режимов, отвечающих условиям оптимального вращения, а именно, графики момента вращения для четырех исследованных режимов (U^*, ω^*): (5, 1.65), (10, 3.34), (15, 5.12), (20, 6.80). Наблюдаемое незначительное нарушение симметрии относительно оси M=0 можно объяснить дефектами модели САПР.

На рис. 12 в полярной системе координат показаны графики момента вращения для трех наборов параметров (U^*, ω^*), реализующих оптимальный режим для модели 3: (10, 3.34), (15, 5.12), (20, 6.80). Направление ветра отвечает углу 0°. На этом рисунке приведены модуль вращательного момента (слева) и сам момент (справа) как функции полярного угла. Хорошо видна «трехлепестковая» картина момента вращения, порождаемая трехлопастной конструкцией ветроустановки, и влияние скорости ветра на эту картину.

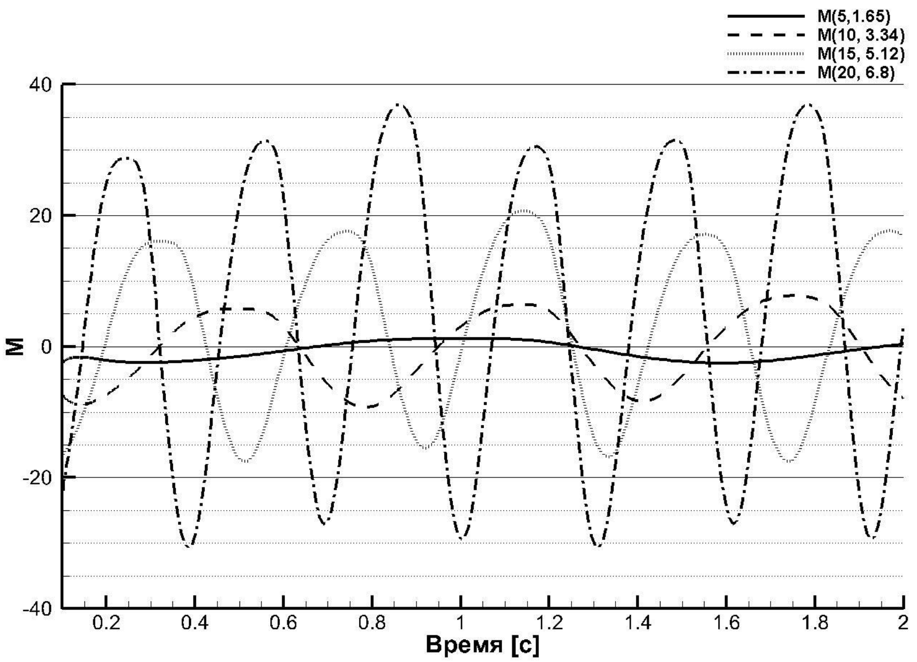

Рис. 11. Вращающий момент для четырех комбинаций $(U, \omega) = (5, 1.65)$, (10, 3.34), (15, 5.12), (20, 6.80), реализующих оптимальный режим. Модель 3

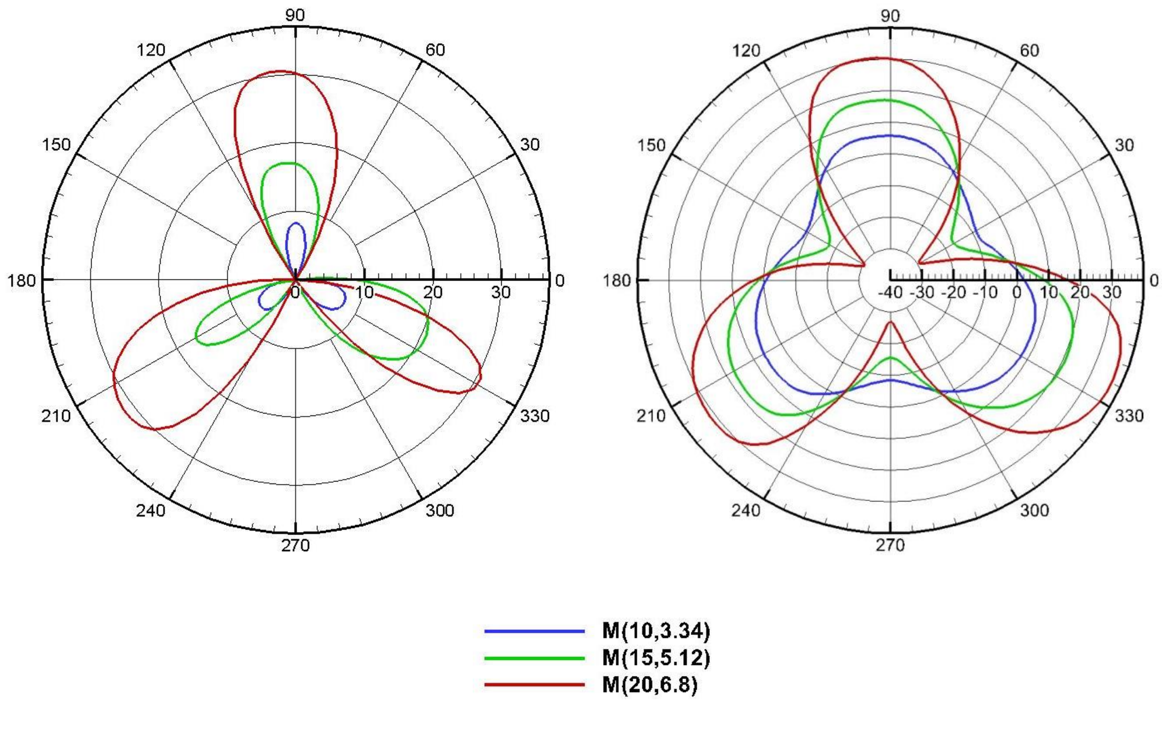

Рис. 12. Вращающий момент для модели 3 в полярных координатах для трех режимов работы

Для верификации численных результатов для модели 3 проведены расчеты на двух сетках. Сетка 1 содержит ~2 млн узлов, сетка 2 ~ 4.3 млн узлов. На рис. 13 для каждого из двух расчетов показаны линии оптимальных параметров (линии нулевого среднего момента) на плоскости (U,ω); отличия между ними составляют 2–7%, т.е. качественно результаты не поменялись.

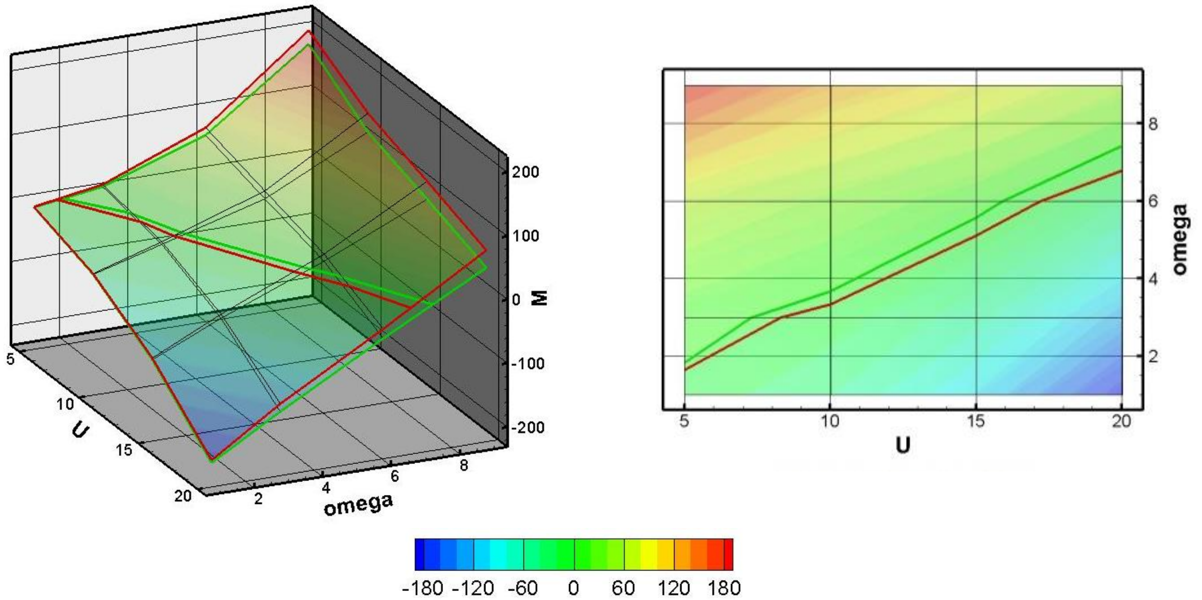

Рис. 13. Вращающий момент $\mathrm{M} = \mathrm{M}_{avr}(U,\omega)$ для двух сеток: сетка 1 – красный цвет; сетка 2 – зеленый цвет. Модель 3

Заметим, что характерное время одного расчета ~5 часов, при этом реализовывался параллельный режим с использованием 128 процессоров. Ниже на рис. 14 приведено поле давления для модели 3.

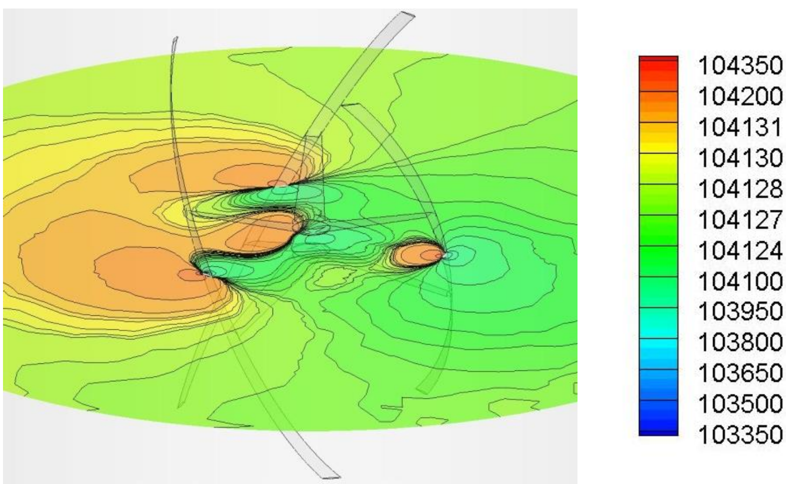

Рис. 14. Распределение давления в центральной горизонтальной плоскости при вращении модели 3 с параметрами $(U,\,\omega)$ = (15, 5.12)

5. Заключение

В данной работе изложена вычислительная технология для выполнения параметрических аэродинамических исследований различных конфигураций вертикально-осевых ветротурбин. Численное моделирование турбины с тремя витыми лопастями демонстрирует характер зависимости аэродинамических характеристик турбины от скорости ветра и угловой скорости вращения турбины, а также от изменения геометрических размеров (ширины, длины и угла наклона лопасти), определяющих конструкцию турбины. Предлагаемый подход позволяет определить условия оптимального вращения, а также оценить амплитуду пульсаций момента вращения ветротурбины в зависимости от угловой скорости вращения, скорости ветра для рассмотренных моделей ветроустановок.

В настоящее время численное моделирование является основным инструментом исследования ветротурбин, поэтому разработанная технология может найти применение в ветроэнергетике при проведении исследований, связанных с оптимизацией режимов работы ВЭУ.

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность за помощь в выполнении данной работы сотрудникам лаборатории вычислительной аэроакустики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Библиографический список

1. Разработка и организация математического моделирования обтекания неподвижной лопатки энергетической установки /А.Е.Бондарев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 60. 19 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-60
2. Организация разведочного поиска оптимальной формы узла лопастей энергоустановки / С.В.Андреев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 74. 21 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-74
3. Моделирование и визуализация работы узла лопастей сложной формы в энергетической установке / С.В.Андреев, А.Е.Бондарев, А.В.Бондаренко [и др.] // Журнал «Научная визуализация», 2015. Т. 7, № 4. С. 1–12.

4. Моделирование и визуализация работы энергетической установки сложной формы / С.В.Андреев, А.Е.Бондарев, А.В.Бондаренко [и др.] // Матем. моделирование. 2016. Т. 28. № 9. С.125–136.

5. Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte /А.Е.Бондарев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 224. 20 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-224

6. Параллельный программный комплекс NOISEtte для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики / И.В.Абалакин, П.А.Бахвалов, А.В.Горобец [и др.] // Вычисл. методы и программирование. 2012. Т. 13. С. 110–125.

7. Абалакин И.В., Бобков В.Г., Козубская Т.К. Реализация метода расчета течений с малыми числами Маха в программном комплексе NOISEtte // Матем. моделирование. 2017. Т.29. № 4. С. 101–112.

8. Гибридный вычислительный кластер К–60 URL: http://www.kiam.ru/MVS/resourses/k60.html

9. Горелов Д.Н. Полуэмпирический метод расчета оптимальных геометрических параметров ротора Дарье // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. №3. С. 96–104.

10. Горелов Д.Н., Кривоспицкий В.П. Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 1. С. 163–167.

11. Горелов Д.Н., Кузьменко Ю.Н. Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 2. С. 329−334.

12. Горелов Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграфический центр КАН. 2012. 68 с.

13. Rezaeiha A., Kalkman I., Blocken B. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment // Renewable Energy. 2017.Vol. 107. P.373-385.

14. Bedon G., Castelli M.R., Benini E. Experimental tests of a vertical-axis wind turbine with twisted Blades // In Proceedings of the 15th International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering, Istanbul, Turkey, 5–6 December 2013.

15. Alaimo A., Esposito A., Messineo A., Orlando C., Tumino D. 3D CFD Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine. // Energies. 2015. Vol. 8. № 4. P.3013–3033. doi:10.3390/en8043013

16. Gupta R., Biswas A. Computational fluid dynamics analysis of a twisted three-bladed H-Darrieus rotor // J. of Renewable and Sustainable Energy. 2010. Vol. 2. № 4. 043111. doi:10.1063/1.3483487

17. Hansen M.O., Madsen H.A. Review Paper on Wind Turbine Aerodynamics. Journal of fluids engineering. 2011. Vol.133. 114001–1. P.1–12.

18. CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines. Ferrer, E., Montlaur, A. (Eds): Springer Tracts in Mechanical Engineering. 2015.

19. Difuntorum J.K., Danao L.A.M. Improving VAWT performance through parametric studies of rotor design configurations using computational fluid dynamics // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: J. of Power and Energy. 2018.

20. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings. 1992. DOI: 10.2514/6.1992-439

21. Численное исследование аэродинамических и акустических свойств винта в кольце / И.В.Абалакин, В.А.Аникин, П.А.Бахвалов [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 3. С. 130-145. DOI:10.7868/S0568528116030026

Оглавление