

Исследование аэродинамического шума производимого малой ветроэнергетической установкой в условиях рысканья

Н.А. Афанасьева

аспирант Донского государственного технического университета; г. Ростов-на-Дону

e-mail: nadezda.a.afanasyeva@gmail.com

В.В. Дудник

д.т.н., профессор кафедры безопасности технологических процессов и производств Донского государственного технического университета; г. Ростов-на-Дону

Аннотация. С целью исследования аэроакустического качества малых ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения, была поставлена задача прогноза с оптимальной точностью уровня и спектра шума. Рассмотрен шум турбулентного пограничного слоя как основной источник. Уровень звукового давления и спектр шума рассчитаны посредством классической, полуэмпирической модели ВРМ. Рассмотрено ухудшение аэродинамического качества ветроколеса в условиях наличия угла косой обдувки (ошибки рысканья), а также градиентов скорости вблизи мачты и в приземном слое. Результаты аэроакустических расчетов, показали фундаментальное значение локальных углов атаки для спектра шума. Уровень звукового давления находится в прямой зависимости от локальной скорости притекания, возрастая по мере удаленности участка лопасти от оси ее вращения. Спектр шума на локальным радиусе 0,185 м (при полном радиусе лопасти 1 м), с максимальными углом атаки 13,5° и скоростью притекания 6,26 м/с (в верхнем положении лопасти), сосредоточен в диапазоне относительно низких частот от 16 Гц до 700 Гц. В тоже время, на радиусе 0,875 м, угол атаки равен 4,63°, скорость притекания – 27,58 м/с, а спектр шума сосредоточен в широкополосном частотном диапазоне от 1,74 кГц до 20 кГц. Суммарный уровень звукового давления на радиусе 0,875 м составил 78,5 дБл.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, шум турбулентного пограничного слоя, уровень звукового давления, спектр шума, угол атаки.

Введение

Разработки по повышению качества возобновляемых источников энергии являются одними из наиболее востребованных на современном рынке энергетических технологий. Малые горизонтально осевые ветроэнергетические установки (ГО ВЭУ) представляют особый интерес как для промышлен-

ной, так и для частной электрификации, особенно в районах, удаленных от сетей централизованного энергоснабжения. Шум ВЭУ часто выступает ключевым фактором, определяющим ее приемлемость, сравнивая с другими автономными электрогенераторами. В данной статье представлено исследование шума, производимого малыми ГО ВЭУ.

Первоочередной задачей при расчете шума ВЭУ является определение главных механизмов его образования (источников) и предполагаемых уровней. По результатам многих теоретических и экспериментальных исследований, аэродинамический шум турбулентного пограничного слоя – это наиболее характерный механизм, преимущественно определяющий суммарный уровень звукового давления от работы ВЭУ. Задача, решаемая в исследовании, состоит в вычислении уровня и спектра этого вида шума с оптимальной точностью.

Существует множество методов и подходов к решению такой задачи. Известна классификация моделей прогноза шума ВЭУ по степени точности, предложенная M. V. Lawson.

Модели I класса точности ориентированы на быструю оценку ожидаемого уровня звукового давления на основании самых общих параметров ВЭУ (диаметр ветроколеса, мощность, т.п.).

Модели II класса точности рассматривают различные механизмы образования шума, как отдельные источники. Это позволяет оценить вклад того или иного механизма и выявить наиболее существенные.

Модели III класса точности объединяют множество различных по точности и характеру моделей, формируя комплексные инструменты оценки шума ВЭУ.

Степень точности, требуемая для вычисления шума турбулентного пограничного слоя, обеспечивается моделями II класса. Такие модели широко используются, благодаря своей специфической направленности и возможности корректной интерпретации результатов. Большинство из них основано на работах [1–3].

В ходе серий аэродинамических и аэроакустических исследований F. T. Brooks, D. S. Pope, M. A. Marcolini разработали одну из наиболее известных и широко применяемых полуэмпирических моделей, получившую название ВРМ. Указанная модель оптимальна для исследования и прогноза аэродинамического шума ВЭУ.

Математическое моделирование

Методика оценки аэродинамики ветроколеса ГО ВЭУ. Угол атаки является фундаментальным параметром аэродинамики обтекаемых тел. Он обуславливает режим обтекания, определяя особенности формирования и развития турбулентного пограничного слоя. Аэродинамический шум преимущественно характеризуется режимом обтекания и обусловлен турбулентностью пограничного слоя.

В случае традиционной конструкции ВЭУ пропеллерного типа с горизонтальной осью вращения распределение углов атаки вдоль лопасти и по азимуту вращения можно представить в виде так называемых концентрического и азимутального распределений. При этом концентрическое распределение зависит преимущественно от изменения геометрических параметров вдоль лопасти. Азимутальное распределение отражает влияние факторов окружающей среды, таких как градиенты скорости ветра в приземном слое и вблизи мачты, на которой размещается гондола ВЭУ, присутствие ошибки рысканья ВЭУ и т.п.

Угол атаки определяет точку схода вихрей с образующей аэродинамического профиля лопасти в каждом элементарном сечении. На рис. 1а представлена схема скоростей и углов, возникающих на профиле лопасти при вращении. Рис. 1б, в схематически отражают принцип перехода между режимами обтекания при достижении критического значения угла атаки $\alpha_{кр}$.

Можно видеть, что угол атаки α_A является составляющей угла притекания β , отличаясь от него на локальный угол установки профиля лопасти φ . При этом, α_A является функцией от локальной скорости притекания, V_Σ . Скорость V_Σ включает в себя скорость набегающего на ветроколесо ветрового потока V_0 за вычетом индуктивной составляющей $V_{инд}$ (V_1) и составляющую скорости, ориентированную по вектору силы, направленной на вращение (в элементарном сечении с радиусом r и радиальной скоростью ω). На итоговую величину V_Σ также накладывается влияние угла косо́й обдувки, обусловленного ошибкой рысканья, а также градиенты скоростей ветрового потока вблизи мачты (тень мачты) и земной поверхности.

Таким образом, локальный угол атаки описывается общей формулой:

$$\alpha_A = \beta - \varphi = \arctg \frac{V_Y}{V_X} - \varphi, \quad (1)$$

где V_Y – составляющая скорости притекания, направленная вдоль оси вращения ветроколеса Y (по направлению силы тяги); V_X – составляющая скорости притекания, ориентированная вдоль плоскости вращения ветроколеса X (по вектору силы, направленной на вращение).

Полная модель, позволяющая рассчитать основные аэродинамические параметры работы ГО ВЭУ, приведена в [4].

Отметим, что влияние тени мачты на величину скорости притекания представляет собой задачу обтекания кругового цилиндра плоскопараллельным течением воздуха. Уравнения для определения радиальной и тангенциальной составляющих скорости при этом имеют вид [5]:

$$\begin{cases} V_r = V_0^h \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r_T^2}\right) \cos(\theta) \\ V_s = -V_0^h \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r_T^2}\right) \sin(\theta) \end{cases}, \quad (2)$$

где r_T^ψ – расстояние от центра мачты до элемента лопасти в зависимости от ее азимутального положения (ψ), м; a – радиус мачты, м; θ – полярный угол, °.

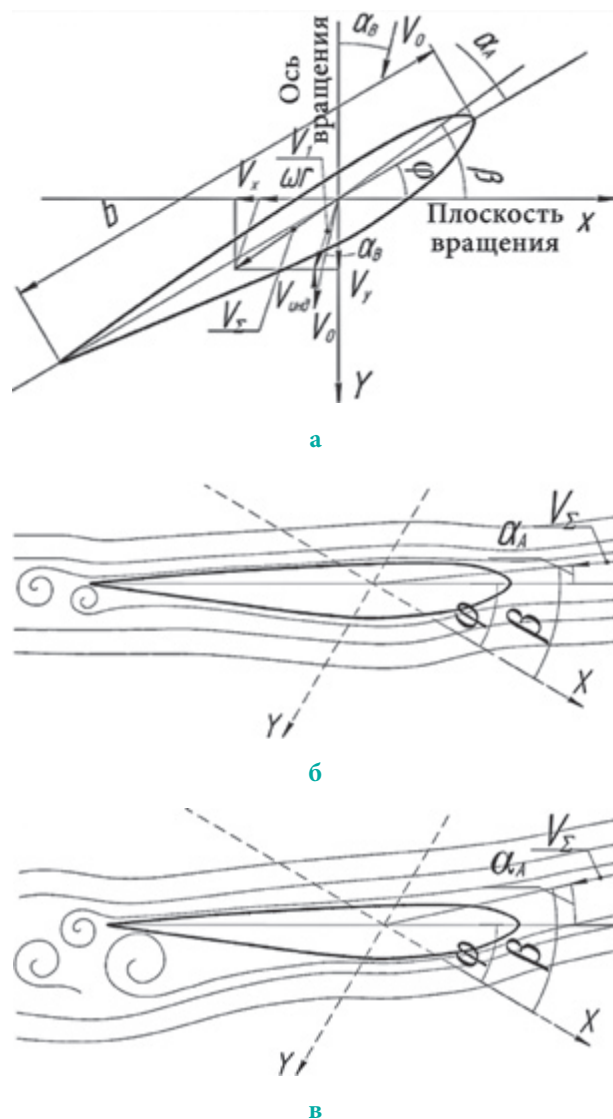


Рис. 1. Схема скоростей и углов, возникающих на аэродинамическом профиле лопасти (а). Режимы обтекания профиля, вызывающие характерный аэродинамический шум: б – обтекание без срыва потока ($\alpha_A \leq \alpha_{кр}$); в – обтекание со срывом потока ($\alpha_A > \alpha_{кр}$)

При этом, угол θ и расстояние r_T^ψ определяются по формулам:

$$\theta = \arctg\left(\frac{r_T \cdot \sin(\psi)}{a \cdot (1+n)}\right), \quad (3)$$

$$r_T^\psi = \sqrt{(a \cdot (1+n))^2 + (r_T \cdot \sin(\psi))^2}, \quad (4)$$

где r_T – нормальное расстояние от центра мачты до плоскости ветроколеса.

Для удобства расстояние r_T фиксируется как n значений радиуса a . Итоговая скорость ветрового потока в области влияния тени мачты примет вид:

$$V(\psi) = \sqrt{(V_r)^2 + (V_s)^2}. \quad (5)$$

Очевидно, что выражение будет действительно только для половины плоскости вращения $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ и $270^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$, при $\psi = 0$ в крайнем нижнем положении лопасти. Практические исследования однако показали, что область влияния меньше и расположена в пределах $0^\circ \leq \psi \leq 70^\circ$ и $250^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$ [6].

Неравномерность величины скорости набегающего ветрового потока в плоскости вращения ветроколеса, а также прочие факторы, указанные выше, приводят к нарушению баланса распределения локальной скорости притекания на лопасти по азимуту ее вращения и к неравномерности распределения локальных углов атаки.

Методика оценки аэроакустики ветроколеса ГО ВЭУ. Аэродинамический шум, возникающий на профиле лопасти ветроколеса можно представить как функцию от величины угла атаки.

Звуковые волны, распространяющиеся от поверхности лопасти при ее вращении, отражают изменения поверхностного давления в турбулентном пограничном слое. При этом пограничный слой формируется вдоль образующей аэродинамического профиля лопасти, а шум является следствием схода вихрей с замыкающей кромки. Так, в условиях дозвукового течения выделяют два основных режима обтекания, приводящих к возникновению характерных типов шума [3]:

- обтекание без срыва – поток отделяется от поверхности лопасти в области замыкающей кромки со стороны разрежения, вызывая, так называемый, шум турбулентного пограничного слоя на замыкающей кромке (*Turbulent Boundary Layer Trailing Edge (TBL-TE) noise*) (рис. 1б);

- обтекание со срывом – при углах атаки выше критического, поток со стороны разрежения, существенно отделяется, приводя к срыву крупных вихрей, прежде, чем поток достигнет замыкающей кромки.

Это приводит к утолщению пограничного слоя, взаимодействию вихрей с поверхностью лопасти и возникновению так называемого шума турбулентного пограничного слоя при срыве потока (*TBL Separation Stall (TBL-SS) noise*) (рис. 1в)). Крупные вихри пограничного слоя вызывают звуковые колебания более низкой частоты и большей амплитуды.

Решение таких задач аэроакустики успешно реализуется в моделях, определяемых по классификации *M. V. Lawson* [7] как модели II класса точности. В рамках подобных моделей применяется подход деления лопасти на конечное число элементов, каждый из которых характеризуется определенными геометрическими параметрами, а также локальными значениями скорости притекания и угла атаки, что определяет индивидуальный вклад каждого элемента в общую картину производимого шума. Для исследования аэроакустических качеств ГО ВЭУ оптимальным является применение полуэмпирической модели *BPM* [3].

Основное выражение для определения суммарного уровня звукового давления (УЗД) *TBL-TE* шума в 1/3 октавных полосах частот имеет вид:

$$SPL_{TBL-TE} = 10 \log_{10} \left(10^{SPL_p/10} + 10^{SPL_s/10} + 10^{SPL_{\alpha_A}/10} \right) \quad (6)$$

при $\alpha_A \leq \alpha_{кр}$,

где SPL_{TBL-TE} – УЗД от взаимодействия турбулентности пограничного слоя с замыкающей кромкой лопасти, дБ; α_A – угол атаки лопасти; $\alpha_{кр}$ – критический угол атаки, приводящий к срыву потока; SPL_p – УЗД на нагнетающей стороне лопасти, дБ:

$$SPL_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_p^* M^5 L \bar{D}_H}{r_e^2} \right) + A \left(\frac{St_p}{St_1} \right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1; \quad (7)$$

SPL_s – УЗД со стороны разрежения, дБ:

$$SPL_s = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_H}{r_e^2} \right) + A \left(\frac{St_s}{St_1} \right) + (K_1 - 3); \quad (8)$$

SPL_{α_A} – УЗД, учитывающий вклад изменения угла атаки, дБ:

$$SPL_{\alpha_A} = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_H}{r_e^2} \right) + B \left(\frac{St_s}{St_2} \right) + K_2, \quad (9)$$

где δ_p^* и δ_s^* – толщина пограничного слоя со стороны нагнетания (*pressure*) и разрежения (*suction*), соответственно, являющиеся функциями от числа Рейнольдса и угла атаки.



При режиме обтекания со срывом, когда $\alpha_A > \alpha_{кр}$, выражение (6) принимает вид:

$$SPL_{TBL-SS} = 10 \log_{10} \left(\underbrace{10^{SPL_p/10}}_{=0} + \underbrace{10^{SPL_s/10}}_{=0} + 10^{SPL_{\alpha_A}/10} \right) \quad (10)$$

при $\alpha_A > \alpha_{кр}$,

где

$$SPL_p = -\infty,$$

$$SPL_s = -\infty.$$

$$SPL_{\alpha_A} = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_L}{r_e^2} \right) + A' \left(\frac{St_s}{St_2} \right) + K_2, \quad (11)$$

где L – длина элемента профиля лопасти, м; r_e – расстояние от источника до точки наблюдения, м; $\bar{D}_H$, $\bar{D}_L$ – функции направленности шума преобразованного диполя (индекс L указывает на низкочастотный предел, H – на высокочастотный); St_s , St_p – числа Струхала со стороны разрежения: $St_s = f \delta_s^* / V_\Sigma$, и нагнетания: $St_p = f \delta_p^* / V_\Sigma$; f – звуковая полоса частот; St_2 – число Струхала взаимодействия турбулентного пограничного слоя с замыкающей кромкой лопасти, $M = V_\Sigma / c_0$ – число Маха; c_0 – скорость звука. A и B отражают функции формы спектра, зависящие от числа Струхала. И наконец, K_1 , K_2 и ΔK_1 являются масштабными коэффициентами [3].

Механизм шумообразования TBL представляет собой источник широкополосного шума. Характерная частота (соответствующая пиковому значению) находится в обратной зависимости от толщины пограничного слоя δ^* , т.е. $f \sim 1/\delta^*$, поскольку преобладающий масштаб вихревых образований в турбулентном пограничном слое сопоставим с толщиной пограничного слоя. Флуктуации давления, таким образом, отражают перемещение вихрей в пограничном слое. Последние перемещаются со скоростью конвекции, определяемой из скорости притекания [3].

УЗД аэродинамического шума находится в очевидной зависимости от скорости притекания V_Σ . Преимущественными источниками шума являются элементы лопасти, наиболее удаленные от оси вращения, поскольку окружная скорость возрастает по мере удаления от центра. Эту особенность наблюдали в своих экспериментах [8], при измерениях шума, производимого ГО ВЭУ 2.3 MW с диаметром ветроколеса 94 м. Также по мере удаления от оси вращения повышается частота шума. Авторы отмечают, что если на радиусе 21 м характерная частота составляла 315 Гц, то на радиусе 26 м – 5 кГц [8]. Обтекание торцевой части лопасти обладает своей спецификой, не рассматриваемой в настоящей статье.

Важно также отметить, что в рамках BPM модели учтена тенденция смещения характерной частоты в область более низких частот по мере увеличения значения угла атаки. Авторы модели [3] наблюдали это явление в ходе своих экспериментальных исследований над аэродинамическим профилем с хордой 30,48 см. Так, при $\alpha_A = 3^\circ$ и $V_\Sigma = 37,1$ м/с спектр в 1/3 октавных полосах частот достигал максимального значения амплитуды в диапазоне от 0,2 до 5 кГц. При $V_\Sigma = 55,5$ м/с изменение в спектре характеризуется смещением в область более высоких частот 0,5...16 кГц и при $V_\Sigma = 71,3$ м/с спектр достиг максимума в диапазоне от 0,8 до 16 кГц.

Обсуждение и результаты. Рассмотрим малую ГО ВЭУ с диаметром ветроколеса 2 м при частоте вращения на установленную мощность 320 мин⁻¹. Ошибка рысканья исследуемой ВЭУ, полученная экспериментально, составляет 11,6° [9]. Распределение значения угла атаки в плоскости вращения лопасти, отраженное в общей формуле (1), было получено посредством разработанной ранее модели, приведенной в [4]. При этом лопасть была разбита на семь сегментов с локальными радиусами: 0,175; 0,275; 0,375; 0,475; 0,575; 0,875 и 0,92 м. Принимая, что основной источник шума вдоль лопасти представляет собой элемент, наиболее удаленный от оси вращения, за исключением торца лопасти, его локальный радиус будет соответствовать 0,875 м.

Используя уравнения (2-5) было оценено влияние тени мачты на каждом элементе лопасти. На итоговых графиках (рис. 2) отражено изменение значения угла атаки по азимуту вращения в области тени мачты для элемента лопасти с радиусом 0,875 м при скорости набегающего ветрового потока 6 м/с. Видно, что чем меньше расстояние от мачты до ветроколеса, тем больший скачок величины угла атаки наблюдается в момент прохождения лопасти мимо мачты (рис. 2 слева, справа). График асимметричен относительно нулевого значения азимута, что обусловлено присутствием ошибки рысканья.

Локальные величины угла атаки изменяются как вдоль радиуса лопасти, так и по азимуту ее вращения. На графике (рис. 3) видно, что распределение имеет горизонтальную асимметрию, связанную с влиянием ошибки рысканья на градиент скорости в области тени мачты; вертикальную, обусловленную влиянием градиентов скорости в приземном слое и в области тени мачты, а также влиянием ошибки рысканья на локальную скорость притекания.

Таким образом, угол атаки на элементе лопасти, определенном как основной источник TBL

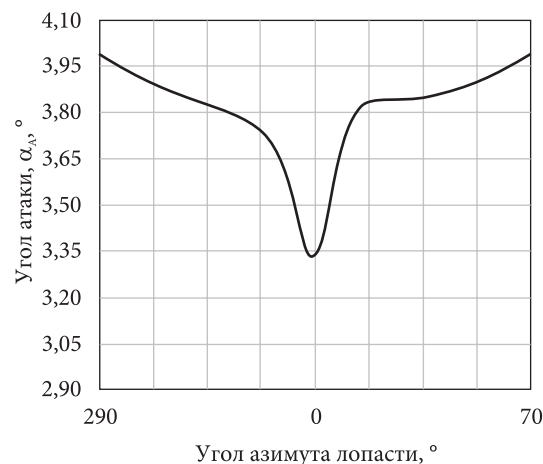
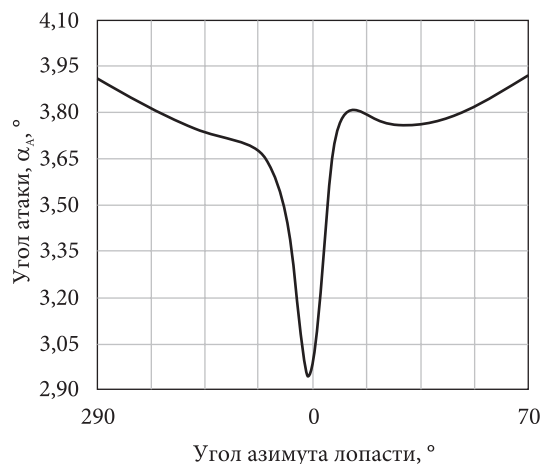


Рис. 2. Влияние мачты на распределение угла атаки по азимуту вращения элемента лопасти, являющегося основным источником шума вдоль лопасти (скорость ветра – 6 м/с, $\psi = 0$ – крайнее нижнее положение лопасти) в зависимости от удаленности ветроколеса от мачты: мачта удалена на два ее радиуса от ветроколеса (слева), мачта удалена на три ее радиуса от ветроколеса (справа)

шума, находится в диапазоне от 3° до $4,6^\circ$. Концентрическое распределение углов атаки показывает существенное уменьшение величины вдоль радиуса лопасти. В соответствии с данными, приведенными в [3], критический угол атаки для профиля *NACA 0012* равен $12,5^\circ$. Соответственно, критические значения углов атаки ожидаются на элементах лопасти, наиболее приближенных к оси вращения, вплоть до значения $r_T = 0,216$ м (лопасть в верхнем положении), где $\alpha_A = 12,39^\circ$. Максимальные значения углов атаки при этом следует ожидать на более близких к центру элементах, где их значения достигают $13,5^\circ$ на $r_T = 0,185$ м и $15,4^\circ$ на $r_T = 0,15$ м (начальный радиус лопасти).

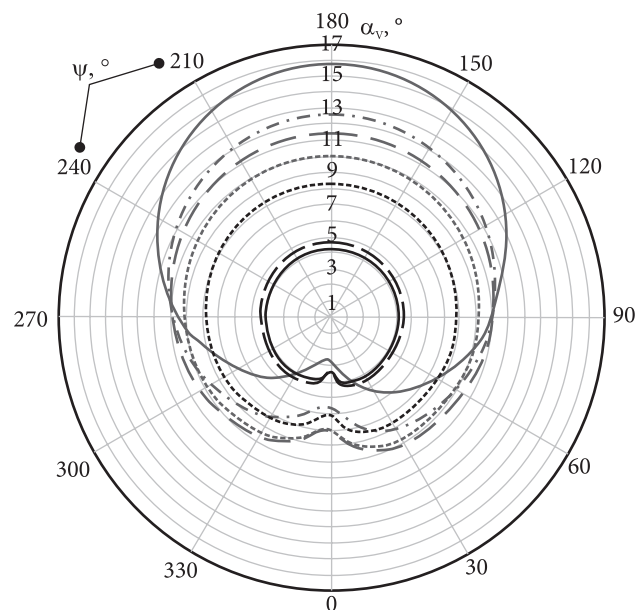
BPM модель для расчета *TBL* шума, отраженная в основных выражениях (6–12), применена в данном исследовании при следующих исходных параметрах: семь элементов лопасти обладали хордами: 0,15; 0,138; 0,127; 0,115; 0,103; 0,92 и 0,08 м; протяженность каждого элемента – 0,125 м; плотность воздуха при 20°C , $\rho = 1,2041$; вязкость воздуха, $\nu = 1,83 \cdot 10^{-5}$; профиль лопастей – *NACA 0012*.

Для получения амплитудно-частотной характеристики шума элементов лопасти в широком диапазоне углов атаки удобно представить результаты моделирования в виде графиков уровней звукового давления в 1/3 октавных полосах частот для диапазона углов атаки от 0° до 25° (рис. 4). Результирующие графики распределения УЗД для *TBL-TE* шума (обтекание без срыва потока) и *TBL-SS* шума (обтекание со срывом потока) на элементах лопасти с $r_T = 0,185$ м (рис. 4а) и $r_T = 0,875$ м (рис. 4б), отражают прогнозируемые спектры *TBL* шума.

Предварительные расчеты показали, что величина локального угла атаки возрастает в верхней половине ветроколеса, а также находится в обратной зависимости от значения локального радиуса. Как

уже было отмечено, критические значения углов атаки ожидаются на участке лопасти до $r_T = 0,29$ м (в верхнем положении лопасти при $\alpha_B = 11,6^\circ$). Эта область будет источником *TBL-SS* шума.

Суммарный УЗД (по всему частотному спектру) на элементе-источнике с $r_T = 0,875$ м про-



Угол атаки на элементах лопастей локальными радиусами r_T :

— $r_T=0,920$ м; — — $r_T=0,875$ м; - - - $r_T=0,575$ м;
 - - - $r_T=0,475$ м; — — $r_T=0,375$ м; - . . . $r_T=0,275$ м;
 — $r_T=0,175$ м;

Рис. 3. Распределение углов атаки по азимуту вращения (ψ) элементов лопасти, удаленных на локальный радиус r_T от оси вращения (ошибка рысканья – $11,6^\circ$, диаметр ветроколеса – 2 м, скорость ветра – 6 м/с, высота расположения втулки ветроколеса – 5 м, мачта удалена на два ее радиуса от ветроколеса)

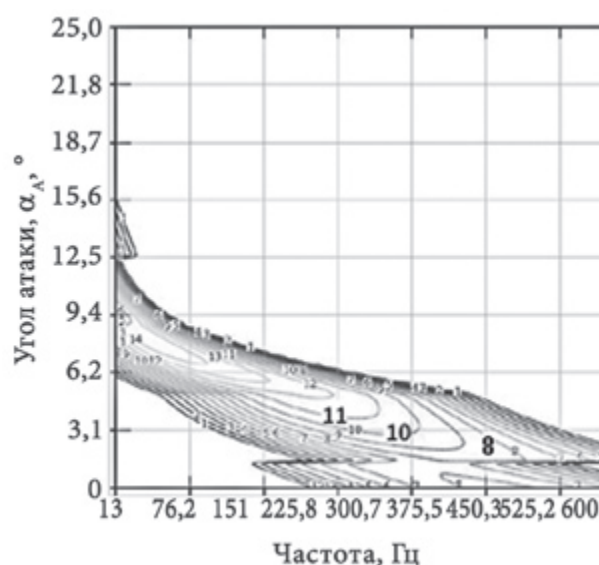
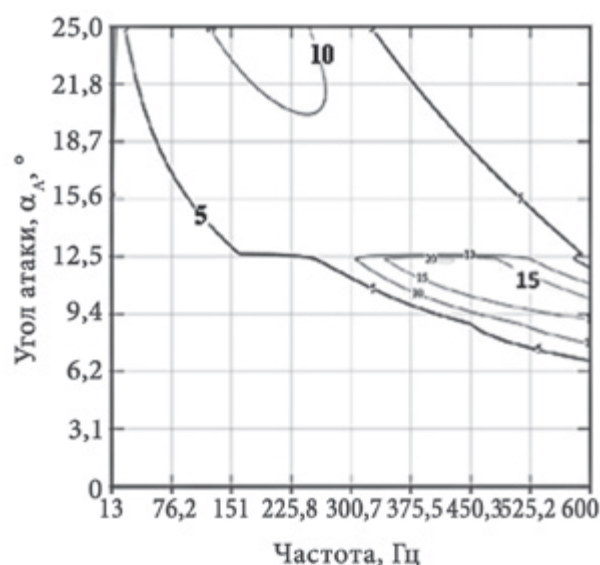
гнозируется равным 78,5 дБ. Отмеченный выше рост суммарного уровня звукового давления вдоль радиуса лопасти отражен на рис. 5а справа, слева.

Характерные изменения в спектре шума турбулентного пограничного слоя лопасти по мере удаления от оси ее вращения отражены в графиках, приведенных на рис. 5б справа, слева. Наглядно видно, что при $\alpha_B = 11,6^\circ$ спектр шума на участке с радиусом 0,225 м и прогнозируемыми величинами $\alpha_A = 13,54^\circ$ и $V_\Sigma = 7,4$ м/с (в верхнем положении лопасти), сосредоточен в полосе относительно низких частот с характерной частотой 445 Гц (рис. 5в). При этом весь возможный диапазон частот на этом элементе, при широком

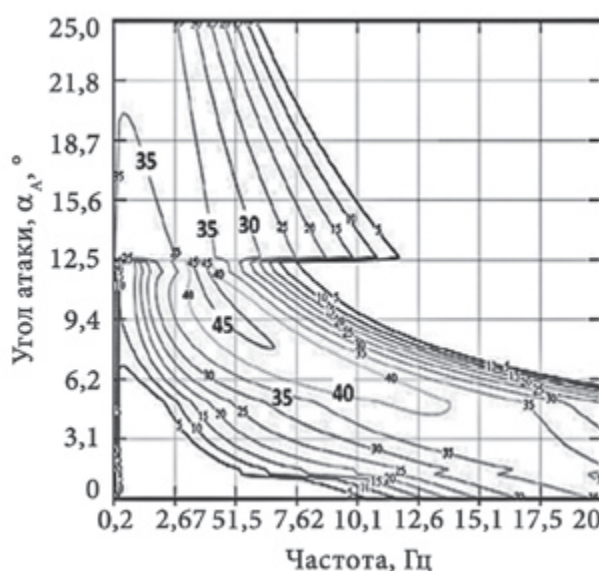
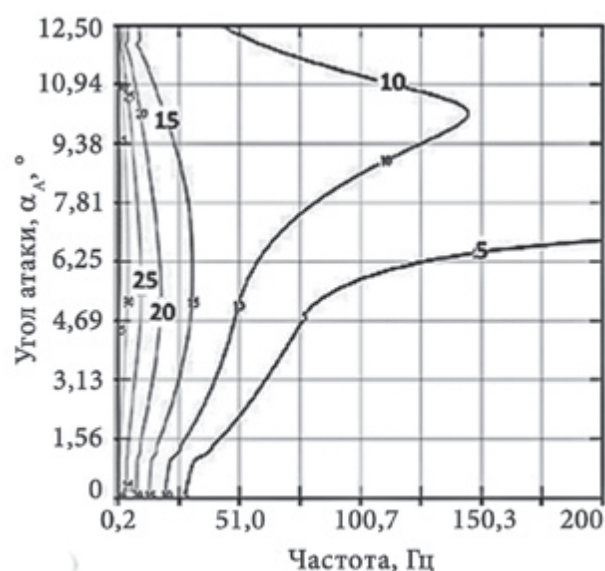
диапазоне углов атаки, не превышает значения 3,5 кГц (рис. 4а).

С другой стороны, на $r_T = 0,875$ м с прогнозируемыми значениями $\alpha_A = 4,6^\circ$ и $V_\Sigma = 27,6$ м/с (в верхнем положении лопасти) (рис. 4б слева), спектр шума сосредоточен в широкополосном диапазоне частот 1,74...14 кГц с характерной частотой 10,75 кГц (рис. 5б).

Отметим, что при нижнем положении лопасти спектр шума и основные частоты преимущественно сосредоточены в широкополосном диапазоне частот и колеблются от 2,5 кГц до 14 кГц (рис. 5б справа). По мере увеличения угла косой обдувки при этом спектр смещается к более высоким частотам.

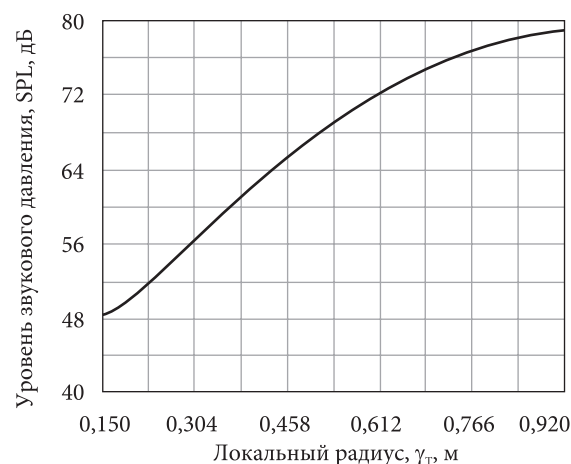
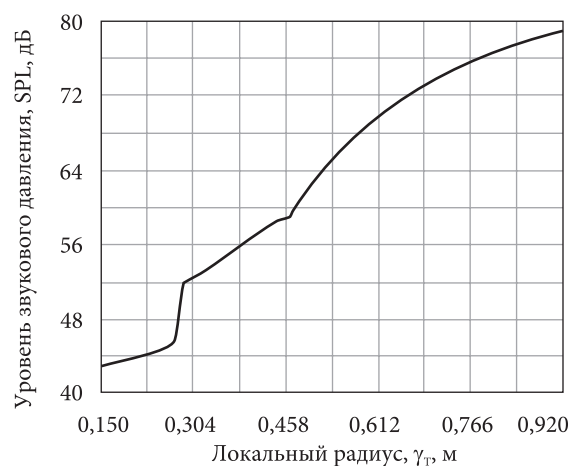


а

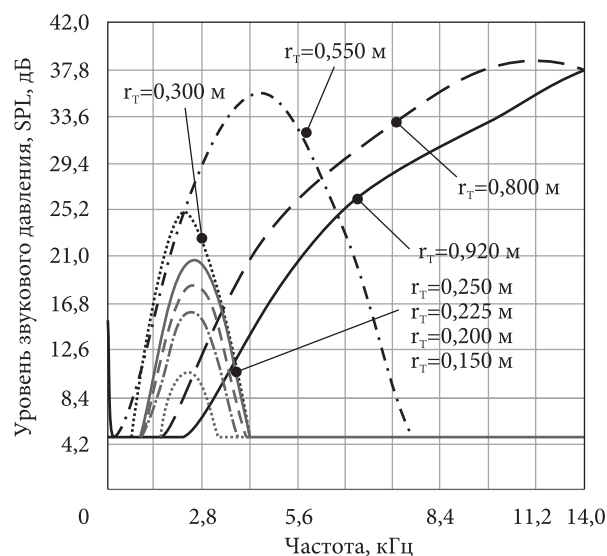
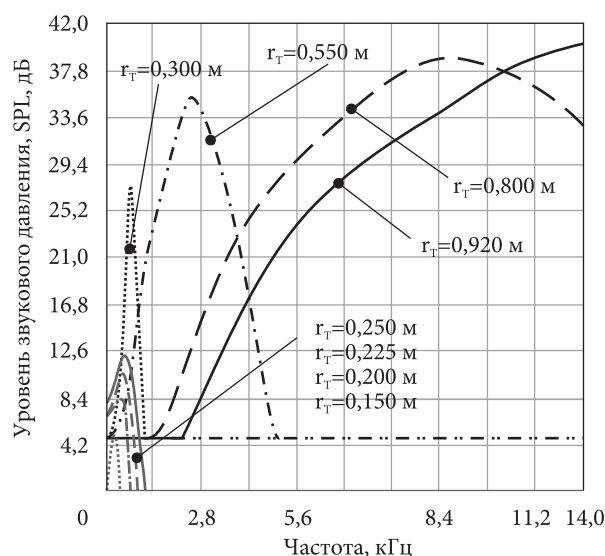


б

Рис. 4. Результирующие графики распределения уровней звукового давления, SPL, для TBL-TE шума (обтекание без срыва потока) и TBL-SS шума (обтекание со срывом потока) на элементах лопасти с локальными радиусами: а – $r_T = 0,225$ м; б – $r_T = 0,875$ м



а



б

Рис. 5. (а) Уровень звукового давления вдоль радиуса лопасти ($\alpha_B = 11,6^\circ$). (б) Амплитудно-частотные характеристики шума турбулентного пограничного слоя (ТБЛ), на элементах лопасти с радиусами r_T ($\alpha_B = 11,6^\circ$): слева – лопасть в верхнем положении; справа – лопасть в нижнем положении

Выводы

Прогнозируемые уровни звукового давления, возникающие на локальных элементах лопасти с определенными радиусами, представлены в виде графиков уровней. Это позволило отразить изменение локального уровня звукового давления в широких диапазонах углов атаки и частот и получить наглядную аэроакустическую характеристику каждого элемента лопасти. Выяснено, что в случае исследуемой ГО ВЭУ шум турбулентного пограничного слоя изменяется вдоль лопасти, как по амплитуде, так и по частоте. Максимальный уровень звукового давления ожидается на элементе лопасти, с радиусом 0,875 м, и составляет 78,5 дБ.

Поскольку критические значения углов атаки ожидаются на участке, не превышающем локального радиуса 0,29 м (в верхнем положении лопасти) вблизи комлевой части, область перехода

обтекания в режим со срывом потока невелика. В виду малых значений скорости притекания на этом участке уровень звукового давления здесь существенно ниже уровня на более удаленных участках лопасти. Поэтому вклад этой области в общий уровень шума – незначительный. С другой стороны, режим обтекания со срывом внесет изменения в спектр, смещая его в область более низких частот. Так, спектр шума, прогнозируемого на элементе лопасти с локальным радиусом 0,255 м и прогнозируемыми величинами $\alpha_A = 13,54^\circ$ и $V_\Sigma = 7,4$ м/с (в верхнем положении лопасти), сосредоточен в полосе относительно низких частот с характерной частотой 445 Гц. В тоже время на элементе с локальным радиусом 0,875 м угол атаки в верхнем положении лопасти равен $4,6^\circ$, скорость притекания – 27,6 м/с, а спектр шума сосредоточен в широкополосном диапазоне частот 1,74...14 кГц с характерной частотой 10,75 кГц.



Литература

1. Glegg, S.A.L. The Prediction of Broadband Noise from Wind Turbines / S.A.L. Glegg, S.M. Baxter, A.G. Glendinning // *Journal of Sound and Vibration*. – 1987. – № 118(2). – P. 217–239.
2. Grosveld F.W. (1985), Prediction of Broadband Noise from Horizontal Axis Wind Turbines / F.W. Grosveld // *Journal of Propulsion and Power*. – 1985. – № 1(4). – P. 292–299.
3. Brooks, F.T. Airfoil Self-Noise and Prediction / F.T. Brooks, D.S. Pope, M.A. Marcolini // NASA Langley Research Center. Hampton. NASA RP-1218. – 1989. – 137 p.
4. Афанасьева Н.А., Дудник В.В., Гапонов В.Л. Моделирование обтекания горизонтально-осевой ветроэнергетической установки малой мощности в условиях рыскания // *Инновации в сельском хозяйстве. Материалы по итогам 10-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве»*, 21-22 мая 2016 г. – ФГБНУ ВИЭСХ. – 2016. – № 5(20). – С. 371–376.
5. Мхитарян А.М. Аэродинамика / науч. ред. Г.Ф. Бурого. – М.: Машиностроение, 1976. – 447 с.
6. Bullmore, A.J. Wind turbine measurements for Noise source identification / A.J. Bullmore [et al.] // *Energy Technology Support Unit*. – 1999. – ETSU W/13/00391/00/REP. – 346 p.
7. Lowson, M.V. Assessment and Prediction of Wind Turbine Noise / M.V. Lowson // *Energy Technology Support Unit*. Harwell. ETSU W/13/00284/REP. – 1992. – 59 p.
8. Oerlemans, S. Prediction of wind turbine noise and validation against experiment / S. Oerlemans, J.G. Schepers // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2009. – № 8. – P. 555–584.
9. Гуринов А.С. Математическая модель динамики вращения ветротурбины и поворота малой ветроэнергетической установки для фермерских хозяйств посредством автоматической системы ориентации / А.С. Гуринов, В.Л. Гапонов // *Вестник ДГТУ*. – Т. 11. № 10(61). – 2011. – С. 1763–1770.

Research of Aerodynamic Noise of the Roving Made by small Wind Power Installation in Yaw Conditions

N.A. Afanasieva, graduate student of Don State technical university; Rostov-on-Don

e-mail: nadezda.a.afanasyeva@gmail.com

V.V. Dudnik, doctor of technical sciences, professor of production safety department of the Don state technical university; Rostov-on-Don

Summary. With a research objective of aero acoustic quality of small wind power installations with a horizontal spin axis, the task of the forecast with an optimum accuracy of level and a noise spectrum was set. Noise of a turbulent interface as the main source is considered. The sound pressure level and a noise spectrum are calculated by means of classical, the VRM semiempirical model. Deterioration in aerodynamic quality of a vetrokoles in the conditions of existence of an angle of oblique blowing (a roving error) and also velocity gradients near a mast and in a ground layer is considered. Results of aero acoustic calculations showed fundamental value of local attack angles for a noise spectrum. The sound pressure level is in direct dependence on local speed of a pritekaniye, increasing in process of remoteness of a section of the blade from an axis of its rotation. The noise spectrum on local radius of 0,185 m (in case of the complete radius of the blade of 1 m), with maximum attack angle 13,5° and the speed of pritekaniye of 6,26 m/s (in the upper position of the blade), is concentrated in the range of rather low frequencies from 16 Hz to 700 Hz. At the same time, on the radius of 0,875 m, the attack angle is equal 4,63°, pritekaniye speed – 27,58 m/s, and the noise spectrum is concentrated in broadband frequency range from 1,74 kHz to 20 kHz. The total level of sound pressure on the radius of 0,875 m was 78,5 dB.

Keywords: wind power installation, noise of a turbulent interface, level of sound pressure, noise range, angle of attack.

References:

1. Glegg S.A.L., Baxter S.M., Glendinning A.G. The Prediction of broadband noise from wind turbines. *Journal of sound and vibration*. 1987. No. 118(2). Pp. 217–239.
2. Grosveld F.W. Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines. *Journal of propulsion and power*. 1985. No 1(4). Pp. 292–299.
3. Brooks F.T., Pope D.S., Marcolini M.A. Airfoil self-noise and prediction. *NASA langley research center*. Hampton. NASA RP-1218. 1989. 137 p.
4. Afanasieva N.A., Dudnik V.V., Gaponov V.L. Energy supply and energy efficiency in agriculture. *Proceedings of the 10th International scientific and technical conference on 21 – 22 May 2016*. In 5 parts. Volume 4: Renewable energy. Local energy sources. Ecology. The federal scientific agroengineering center VIM. Pp. 371–376.
5. Mkhitarayan A.M., Burago G.F. Aerodynamics. *Mechanical engineering*. 1976. Moscow, 447 p.
6. Bullmore A.J. Wind turbine measurements for Noise source identification. *Energy technology support unit*. 1999. ETSU W/13/00391/00/REP. 346 p.
7. Lowson M.V. Assessment and prediction of wind turbine noise. *Energy technology support unit*. Harwell. ETSU W/13/00284/REP. 1992. 59 p.
8. Oerlemans S., Schepers J.G. Prediction of wind turbine noise and validation against experiment. *International journal of aero acoustics*. 2009. No. 8. Pp. 555–584.
9. Gurinov A.S., Gaponov V.L. Mathematical model of dynamics of rotation of the wind turbine and turn of small wind power installation for farms by means of the automatic navigation system. *Bulletin of the Don state technical university*. Volume 11. No. 10(61). 2011. Pp. 1763–1770.