



К развитию методик мониторинга ветра для ветроэнергетики

Рецензия эксперта на статью получена 22.01.2025 [The expert review of the article was received on January 22, 2025]

Важнейшей задачей проектирования ветроэлектрических установок (ВЭУ) и станций (ВЭС) является достаточно точный для практики прогноз их средней многолетней мощности и выработки, определяющих энергетическую и экономическую целесообразность их использования. Под достаточной точностью для международной практики, принятой по требованиям кредитных организаций (по нашему мнению, недостаточно обоснованно распространённой и на Россию), принята 10 %-я точность прогноза многолетней выработки ВЭУ, рассчитываемой косвенными методами по данным о скорости и направлении ветра с учётом многолетних прогнозных потерь и погрешностей с обеспеченностью 90 %. При этом во внимание принимаются погрешности измерения и анализа достоверности данных ветровых параметров, моделирования ветровых потоков и мощности ВЭУ и ВЭС, а также возможные технические и климатические потери при их эксплуатации. Для определения прогноза средней многолетней мощности и выработки ВЭУ и ВЭС в России и за рубежом разработаны и постоянно развиваются рас-

чётно-аналитические методы на основе статистических данных многолетних (от десяти лет и более) измерений параметров ветра на метеорологических станциях (МС) и специализированных ветроизмерительных комплексах (ВИК) [1–4].

Согласно зарубежным стандартам [2] проектированию ВЭС должны предшествовать однолетние или двухлетние многоуровневые (от трёх уровней и более) измерения скорости и направления ветра, температуры и давления на ВИК [2].

С учётом весьма трудоёмких, длительных и дорогостоящих (цена до \$ 100 тыс. и более) измерений на ВИК и последующей обработки их данных, рекомендуемый в [2] подход к мониторингу ветра, оправданный при проектировании крупных ВЭС, чреват значительным и даже непосильным удорожанием проектов небольшой мощности с участием ВЭУ, стоимость которых сравнима со стоимостью измерений на ВИК. Необходимость выполнения рекомендаций [2] для проектов ВЭУ и ветродизельных энергокомплексов (ВДК) в удалённых и труднодоступных районах России, является серьёзным препятствием для их реализации.

УДК 551.51. Научная специальность: 2.4.5.

К развитию методик мониторинга ветра для ветроэнергетики

В. Г. Николаев, д.т.н. член-корреспондент РИА, директор АНО «НИЦ «Атмограф»; **А. А. Гамова**, аспирант, Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ» (ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ»)

Рассмотрено развитие методик ветроклиматических исследований, необходимых для проектирования ветроэлектрических станций (ВЭС) и основанных на моделировании высотных профилей скорости ветра по двухлетним данным трёхуровневых измерений скоростей ветра с десятиминутным разрешением на мачтовом ветроизмерительном комплексе (ВИК) в посёлке Темрюк Краснодарского края и по многолетним данным метеостанций в Темрюке, Анапе и Тамани. Выявлены информационные и методические возможности развития моделей высотных профилей скорости и мощности горизонтального ветра и установлены пределы статистической достоверности моделирования указанных параметров, а также рассчитанных на их основе энергетических показателей ВЭС. Разработаны в статье методические подходы на базе относительно новых для России данных ВИК существенно расширяют возможности повышения эффективности проектирования ВЭС на этапе предварительных специализированных измерений ветра и разработки технико-экономических обоснований ВЭС.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, рабочая характеристика ВЭУ, высотный профиль скорости ветра, гистограмма распределения, статистическая достоверность.

UDC 551.51. Scientific specialty number: 2.4.5.

Towards the development of wind monitoring techniques for wind power

V. G. Nikolaev, PhD, corresponding member of the Russian Academy of Engineering (RIA), Director of the "Atmograph" Research & Information Center" Autonomous Non-profit Organization; **A. A. Gamova**, postgraduate student, "VIM Federal Scientific Agroengineering Center" Federal State Budgetary Scientific Institution (FSBI "FNATs VIM")

The article is devoted to the development of wind climate research techniques necessary for the design of wind power plants and based on the modeling of high-altitude wind velocity profiles based on two-year data from three-level wind velocity measurements with a ten-minute resolution at a mast wind measuring complex in the village of Temryuk, Krasnodar region, and on long-term data from weather stations in Temryuk, Anapa and Taman. The information and methodological possibilities of developing models of high-altitude profiles of horizontal wind speed and power have been identified and the limits of statistical reliability of modeling these parameters, as well as the energy indicators of wind farms calculated on their basis, have been established. The methodological approaches developed in the article based on relatively new data from wind measuring systems in Russia significantly expand the possibilities of improving the efficiency of wind power plant design at the stage of preliminary specialized wind measurements and the development of feasibility studies for wind farms.

Key words: wind turbine, wind turbine operating characteristics, high-altitude wind velocity profile, distribution histogram, statistical reliability.

Целью работы является развитие методических подходов к повышению эффективности предпроектных исследований для ВЭС в части мониторинга ветра и обработки получаемых в его ходе данных для моделирования многолетних показателей мощности и выработки электроэнергии ВЭУ и ВЭС и оценка достоверности их моделирования на примере данных двухгодичных трёхуровневых измерений скорости и плотности ветрового потока на ВИК в посёлке Темрюк Краснодарского края и многолетних данных трёх ближайших к ВИК метеостанций (МС «Темрюк», «Анапа», «Тамань»).

Достоверность моделирования мгновенной мощности ВЭУ по данным ВИК определяется погрешностями измерений параметров ветра на каждом из уровней его измерений (для данного ВИК — на высотах 20, 40 и 62 м), статистическим разбросом (среднеквадратическими отклонениями, СКО) данных измерений, а также неточностью моделирования вертикальных профилей скорости $v(h)$ ветра на высоте ветроколеса (ВК) ВЭУ $H_{ВК}$, чаще всего превышающей высоту верхнего уровня измерений на ВИК. При этом известно, что модели $v(h)$ не всегда адекватно физически и математически описывают их реальные высотные распределения в приземном (до 100–200 м) слое атмосферы (ПзСА) [4].

Развитие моделей $v(h)$ по мере накопления метеорологических данных и средств их обработки и моделирования актуально в научном и практическом плане в связи с широким использованием при решении задач в ветроэнергетике, авиации, экологии, высотном строительстве, климатологии, военном деле.

Средняя скорость $v(h)$ [м/с] и удельная мощность ветра W [кВт/м²] на высоте h [м] в заданном направлении согласно [4] наиболее точно рассчитываются как:

$$v(h) = \int_0^\infty v(h) f[v(h)] dv = \sum_{i=1}^I v_i(h) f[v_i(h)]; \quad (1)$$

$$W(h) = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3(h) f[v(h)] dv = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^I v_i^3(h) f_i[v_i(h)], \quad (2)$$

где $f_i[v_i(h)]$ — повторяемость горизонтальной скорости ветра в середине i -й градации на высоте h ; i — число градаций скорости при определении $f_i[v_i(h)]$ на высоте h ; $f[v(h)]$ — функции плотности вероятности распределения сезонных и годовых скоростей ветра на высоте h , аппроксимирующие их эмпирические повторяемости; ρ — значение плотности



воздуха, определяемое по данным измерений на ВИК давления и температуры по закону идеального газа.

В качестве показателя средней многолетней мощности ВЭУ с горизонтальной осью вращения согласно [5] используется удельная — на единицу площади ветроколеса ВЭУ — мощность ВЭУ $P_{уд}(v, \rho)$ [Вт/м²], рассчитываемая по формулам:

$$P_{уд}(v, \rho) = C_p(v) \frac{\rho v^3}{2}, \quad (3)$$

где C_p представляет собой C_p -фактор — техническую характеристику ВЭУ, определяющую реально достижимую долю удельной мощности ветра W [Вт/м²] на высоте оси ветроколеса ВЭУ $H_{ВК}$ (2), которую ВЭУ может преобразовать в полезную электроэнергию, причём значения C_p у наиболее технически совершенных серийно выпускаемых ВЭУ в их рабочем диапазоне ($v_0 \leq v \leq v_{бур}$, где $v_{бур}$ — буревая скорость, при которой вращение ветроколеса ВЭУ останавливается во избежание поломок, обычно $v_{бур} \approx 20$ –34 м/с для разных ВЭУ) с погрешностью $\leq 1\%$ определяются формулами:

$$C_p = A(v - B)^2 + C \quad (4)$$

при $v_0 \leq v \leq v_{рег} = 15$ м/с, где коэффициенты A , B и C равны: $A = -0,0054$, $B = 0,85$ и $C = 0,504$;

$$C_p = 0 \quad (5)$$

при $v < v_0$ и при $v > v_{бур}$ и

$$C_p = \frac{\lambda}{[1 + \xi(v - 16)]^3} \quad (6)$$

при $v_{рег} < v < v_{бур}$, где коэффициенты λ и ξ равны $\lambda = -0,239$ и $\xi = 0,0626$.

Реальные удельные мощности ВЭУ $P_{уд}(v, \rho)$ непосредственно не измеряются, а определяются косвенными расчётами по данным измерений на ВИК по формулам (3)–(6).

Достоверность расчётов по формулам (1) и (2) ограничена погрешностями определения функций $f[v(h)]$ и $f_i[v_i(h)]$. Их параметры в месте предполагаемого размещения ВЭУ могут быть рассчитаны по данным измерений на высоте оси ветроколеса $H_{ВК}$ или смоделированы на разных высотах с разной точностью и разными

периодами осреднения по данным измерений скорости ветра на ближайших метеорологических и аэрологических станциях или на ВИК при наличии последних [4]. Информационной основой для моделирования функций распределения плотности вероятности скорости ветра $f(v)$ в данном исследовании являются гистограммы распределения ветра по градациям скоростей $f_i[v_i(h)]$ ветра, статистически обеспеченные данными ВИК и МС.

Достоверность моделирования мгновенной мощности ВЭУ по данным ВИК определяется погрешностями измерений параметров ветра, статистическим разбросом данных измерений, неточностью моделирования вертикальных профилей скорости ветра на высоте ветроколеса ВЭУ

Данная работа является одной из первых в России методических исследований возможностей изучения высотной структуры ветра по совместным данным ВИК и метеостанций.

Информационная база исследования

ВИК, установленный в посёлке Темрюк, представляет собой мачту высотой 62 м и измерительный комплекс на базе трёх чашечных анемометров производства фирмы NRG (США), закреплённых на этой мачте на трёх высотах: 20, 40 и 62 м, а также двух измерителей направлений ветра, расположенных на высотах 30 и 62 м. Измерения на ВИК в Темрюке производились испанской фирмой Iberdrola с апреля 2009 года по октябрь 2010 года.

Выходными данными ВИК явились непрерывно регистрируемые данные по скорости и направлению ветра, осреднённые за десять минут по двухсекундным замерам на всех трёх уровнях. Данных ВИК подверглись объективному анализу, проверке на достоверность и далее были преобразованы в базу данных для каждого уровня измерений.



Данные МС в Темрюке, Анапе и Тамани взяты из базы данных «Флюгер», созданной в АНО «НИЦ «Атмограф», которая содержит многолетние данные метеорологических измерений с 1940-х годов по настоящее время.

Установление статистических характеристик временных вариаций и высотного хода скоростей и направлений ветра и их СКО для разных высот измерения, при разных периодах осреднения данных ВИК [6], и определение по ним энергетических показателей ВЭУ любых типов с заданными техническими характеристиками проводились многофункциональной компьютерной программой WindRu, разработанной А. А. Гамовой.

Результаты статистического анализа и моделирования

Достоверность моделирования средней многолетней удельной мощности ВЭУ $P_{уд}$ по данным ВИК определяется двумя факторами:

- погрешностями определения средних многолетних значений скорости ветра и плотности ветрового потока на каждом из уровней его измерений (для данного ВИК на высотах 20, 40 и 62 м), определяемыми среднеквадратическими отклонениями (СКО) данных измерений;
- погрешностями моделирования высотных (вертикальных) профилей скорости $v(h)$ и направления $\varphi(h)$ ветра на высоте ветроколеса ВЭУ $H_{вк}$, чаще всего превышающей высоту верхнего уровня измерений на ВИК.

Погрешности расчёта среднегодовой удельной мощности ВЭУ $P_{уд}(v, \rho)$ по данным ВИК на уровнях их измерений определяются погрешностями определения на них двух независимых друг от друга параметров: скорости ветра и плотности воздуха [5], СКО которых необходимо рассчитывать как для независимых случайных величин с учётом установленного в работе [5] отсутствия между ними корреляционной связи.

Абсолютные погрешности двухпараметрических функций $P_{уд}(v, \rho)$, полученных косвенными расчётом по данным измерений на заданном уровне ВИК по формуле (3) с коэффициентами (4), (5) и (6), определяются в данной работе согласно рекомендациям работы [5] полным приращением [формула (7)], представляющим собой сумму частных производных по переменным v и ρ , помноженных на конечные приращения (СКО) соответствующих переменных:

$$\Delta P_{уд}(v, \rho) = \left(\left[\frac{\partial P_{уд}(v, \rho)}{\partial v} \sigma_v \right]^2 + \left[\frac{\partial P_{уд}(v, \rho)}{\partial \rho} \sigma_\rho \right]^2 \right)^{0.5}, \quad (7)$$

определяемых для осреднённых (наиболее вероятных) по всему временному ряду данных ВИК значений скорости ветра и плотности воздушного потока на заданном уровне измерений.

В весьма частом случае, когда высота оси ВЭУ $H_{вк}$ превышает высоту верхнего уровня измерений на ВИК, скорость ветра на высоте $H_{вк}$ определяют расчётным путём с использованием наиболее достоверных моделей высотного профиля скорости ветра $v(h)$ с естественными для моделирования погрешностями, определяющими точность прогноза средней многолетней мощности ВЭУ или ВЭС. Определение этих погрешностей в терминах среднеквадратических отклонений (СКО) скоростей ветра σ_v , рассчитываемых по формуле:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{v_1}^2 + \sigma_{v_2}^2}, \quad (8)$$

где σ_{v_1} — СКО скоростей ветра, рассчитанных по всему временному ряду данных ВИК десятиминутных значений квадратов разностей измеренных скоростей ветра со средним многолетним значением его скорости, определяющие погрешность расчёта средней многолетней скорости по данным ВИК в Темрюке на уровнях 40 и 62 м; σ_{v_2} — СКО высотной аппроксимации скоростей ветра, осуществляемой

исследуемых в данной работе моделями. Формула (8) справедлива при независимых погрешностях определения скоростей ветра, получаемых при измерении на ВИК и при их модельной высотной аппроксимации по данным этих измерений, что справедливо в нашем случае.

Определение достоверности моделирования средней многолетней удельной мощности ВЭУ по данным ВИК

Погрешности моделирования вертикальных профилей скорости $v(h)$ на высоте ветроколеса ВЭУ $H_{вк}$ снижают достоверность моделирования средней многолетней удельной мощности ВЭУ $P_{уд}$ по данным ВИК, и величина этого снижения является объектом данного исследования.

Согласно данным [5], погрешности определения косвенным методом удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{уд}$ по данным измерений на ВИК в Темрюке на высоте 20 м, с учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха при 90 %-й и 95 %-й статистической достоверности, составляют 10,4 и 12,4 %, соответственно, превышая уровень 10 %, принятый за рубежом из соображения гарантированной экономической эффективности ВЭУ. Аналогичные погрешности определения удельной мощности ВЭУ, по данным измерений на ВИК на высоте 40 м при статистической достоверности 90 и 95 % возрастают по сравнению результатами для высоты 20 м и согласно [5] составляют 11 и 13,1 %, соответственно.

Анализ моделей высотных профилей ветра, построенных по данным ВИК

Достоверность моделирования средней многолетней удельной мощности ВЭУ $P_{уд}$ по данным ВИК определяется погрешностями моделирования вертикальных профилей скорости ветра $v(h)$ на высоте ветроколеса $H_{вк}$, чаще всего превышающей высоту верхнего уровня измерений на ВИК. Используемые в данной работе ряды срочных десятиминутных данных ВИК обеспечили исследование и прояснение вопроса о том, какие из рассмотренных моделей высотных профилей скорости $v(h)$ наиболее достоверны для района Темрюка, исследованного в статье, и каковы точность и пределы достоверности аппроксимации реальных профилей скорости ветра $v(h)$ известными одноуровневыми физико-статистическими моделями и их математическими двухуровневыми аппроксимациями

В работе проведены исследования и сравнительный анализ достоверности использования следующих наиболее часто

используемых отечественных и зарубежных одноуровневых моделей высотного профиля скорости ветра $v(h)$ в ПзСА, построенных по данным измерений скорости ветра на нижнем уровне измерений на ВИК $v(h_{\text{НИЖН}})$, в данном случае $h_{\text{НИЖН}} = 20$ м:

$$1. v(h) = v(h_{\text{НИЖН}}) \left(\frac{h}{h_{\text{НИЖН}}} \right)^{1/7}; \quad (9)$$

$$2. v(h) = v(h_{\text{НИЖН}}) \left(\frac{h}{h_{\text{НИЖН}}} \right)^{1/10}; \quad (10)$$

$$3. v(h) = v(h_{\text{НИЖН}}) \left(\frac{h}{h_{\text{НИЖН}}} \right)^{m(v)}, \quad (11)$$

где $m(v) = 0,4 \exp[-0,212 h_{\text{НИЖН}}] + 0,1204$;

$$4. v(h) = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right), \text{ где } \quad (12)$$

$k = 0,4$ — постоянная Кармана; $z_0 = 0,1$ м;

$$5. v(h) = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) + \beta h, \quad (13)$$

где $\beta = h 0,0125 \sin \left(\frac{\pi \varphi}{180} \right)$, $z_0 = 0,1$ м;

$$6. v(h) = \alpha \ln[1 + \beta v(h)]. \quad (14)$$

В моделях №4 и 5 значение параметра $z_0 = 0,1$ м определено согласно классификации поверхности в районе расположения ВИК, принятой ведущей зарубежной методикой WASP [3]. Согласно WASP, в модели №5 параметр φ определяет географическую широту исследуемого пункта и равен $45,25^\circ$ с.ш.

Физическое и математическое обоснование использованных в работе одноуровневых моделей профиля скорости ветра $v(h)$ в ПзСА дано в работах [4, 6, 7].

Новизной данного исследования является анализ предложенных авторами двухуровневых модификаций моделей №1–6, рассчитанных по результатам одноуровневого моделирования скоростей ветра на среднем уровне измерений 40 м по данным измерений скорости ветра на нижнем (20 м) уровне измерений на ВИК и использовании полученных, значений скорости на 40 м для моделировании скоростей ветра на высоте 62 м исследованными моделями. Особый интерес при этом представляет одно- и двухуровневое моделирование логарифмическими функциями в модели №6 [формула (14)], наиболее физически непротиворечивыми из иных рассмотренных и обладающих необходимым набором аэродинамических и физических свойств: условием прилипания на поверхности, гладкостью профиля $v(h)$, линейностью в пристеночном слое и логарифмическим характером [6].

Идея построения двухуровневых моделей профилей $v(h)$ на базе одноуров-

невых моделей и надежды на повышение их количественной адекватности основаны на факте возрастания с высотой h погрешностей моделирования скоростей ветра всеми известными одноуровневыми моделями [4].

Практическому использованию одноуровневых моделей для расчёта высотных профилей скорости ветра $v(h)$, построенных по данным измерений на МС, препятствует отсутствие в исследуемых пунктах экспериментальных данных о скоростях ветра на высотах ПзСА, превышающих высоты измерений на МС, и позволяющих определять точность высотной экстраполяции моделей и выбирать наиболее достоверные из них. Но наличие и использование данных измерений скоростей ветра на разных уровнях ВИК существенно расширяет методические возможности уточнения одноуровневых моделей $v(h)$.

Анализ адекватности построенных моделей и установление погрешностей определения среднегодовых значений скорости ветра проведён сравнением данных измерений скоростей ветра на ВИК на высоте 62 м и результатов моделирования скорости на этой высоте всеми рассмотренными моделями. Наличие временных рядов средних десятиминутных данных почти двухлетних трёхуровневых измерений на ВИК позволяет моделировать скорость ветра и оценивать её погрешность по двум показателям.

Согласно первому по всему ряду данных, всеми моделями моделируются средние значения скорости на уровнях 40 и 62 м для каждой десятиминутки двухлетнего ряда, и суммированием по всему временному ряду квадратов их разностей с данными измерений определяются среднеквадратические отклонения Δ_{40} и Δ_{62} модельных значений скорости от измеренных скоростей.

Вторым показателем являются СКО (σ_{40} и σ_{62}), рассчитанные для каждой модели суммированием по всему временному ряду квадратов разностей результатов моделирования скоростей для каждой де-

сятиминутки с рассчитанной каждой моделью средней скоростью СКО (σ_{40} и σ_{62}). Значения σ_{40} и σ_{62} используются далее для определения погрешности косвенного расчёта мощности ВЭУ по формуле (8).

Сравнение по указанным выше показателям среднегодовых скоростей $v(h)$, рассчитанных по одноуровневым моделям, с данными измерений на среднем (40 м) и верхнем (62 м) уровнях ВИК приведены в табл. 1. По результатам расчётов и сравнительного анализа по двум указанным выше показателям, авторами выявлены наиболее математически адекватные одноуровневые и построенные с их использованием двухуровневые модели высотных профилей среднегодовых скоростей ветра $v(h)$ (табл. 1). К ним относятся степенные (11), (12), построенные по данным измерений на нижних уровнях ВИК (20 м), и разрабатываемая авторами логарифмическая модель (14).



Согласно проведённым методическим расчётам, причинами погрешностей при определении профилей $v(h)$ исследованными в статье моделями являются неточностью задания в методике WASP [2] в логарифмических моделях (12) и (13) параметра шероховатости z_0 и характеристик рельефа поверхности [2, 4], а также отличия и зависимость средних многолетних измеряемых на МС скоростей ветра от рельефа и свойств подстилающей поверхности в районе МС, а также ограничения по высоте применения логарифмического профиля скорости [4, 6].

■ Данные моделирования одноуровневыми моделями среднегодовых скоростей ветра v [м/с] в районе Темрюка на высотах 40 и 62 м по данным ВИК на высоте 20 м и их отклонений Δ [%] от измеренных на высоте 62 м

табл. 1

№	Модель $v(h)$	$v_{20\text{ВИК}}$	$v_{40\text{ВИК}}$	$v_{62\text{ВИК}}$	v_{40}	Δ_{40}	σ_{40}	v_{62}	Δ_{62}	σ_{62}
1	$v(h_{\text{НИЖН}}) (h/h_{\text{НИЖН}})^{1/7}$	6,40	7,05	7,46	7,07	0,73	3,53	7,53	1,06	3,75
2	$v(h_{\text{НИЖН}}) (h/h_{\text{НИЖН}})^{1/10}$	6,40	7,05	7,46	6,86	0,72	3,42	7,39	1,05	3,68
3	$v(h_{\text{НИЖН}}) (h/h_{\text{НИЖН}})^{m(v)}$	6,40	7,05	7,46	7,45	0,81	3,43	7,78	1,10	3,68
4	$(v^*/k) \ln(h/z_0)$, $z_0 = 0,1$	6,40	7,05	7,46	7,73	1,09	3,86	7,59	1,08	3,78
5	$(v^*/k) \ln(h/z_0) + \beta h$, $z_0 = 0,1$	6,40	7,05	7,46	11,28	1,34	5,01	8,14	1,27	7,85
6	$\alpha \ln(1 + \beta h)$, $\alpha = 1$ м/с	6,40	7,05	7,46	7,08	0,72	3,21	7,50	1,04	3,54

Сравнение точности моделирования двухуровневыми моделями среднегодовых скоростей ветра в Темрюке на высоте 62 м по данным ВИК на высоте 20 и 40 м, соответственно, с измеренными на высоте 62 м

табл. 2

№	Модель $v(h)$	Значения Δ_{62}							Значения σ_{62}					
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
1	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{1/7}$	1,06	1,05	1,10	1,08	1,27	1,04	1,08	3,75	3,68	3,68	3,78	7,85	3,54
2	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{1/10}$	1,05	1,07	1,04	1,05	1,14	1,05	1,09	3,64	3,58	3,57	3,67	7,71	3,43
3	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{m(V)}$	1,15	1,09	1,28	1,18	1,51	1,13	1,18	3,64	3,57	3,55	3,67	7,93	3,42
4	$(v^*/k) \ln(h/z_0), z_0 = 0,1$	1,42	1,31	1,56	1,47	1,84	1,30	1,36	4,11	4,03	4,03	4,14	8,14	3,86
5	$(v^*/k) \ln(h/z_0) + \beta h, z_0 = 0,1$	1,66	1,52	1,84	1,72	2,14	1,52	1,56	4,11	4,03	4,02	4,14	8,21	3,89
6	$\alpha \ln(1 + \beta h), \alpha = 1 \text{ м/с}$	1,04	1,05	1,11	1,05	1,25	1,08	1,14	3,42	3,35	3,33	3,45	7,72	3,22

Модель с модифицированным логарифмическим профилем скорости ветра (14), построенного в предположении о реализации в ПзСА высотных профилей скорости ветра с минимальным трением ветровых потоков о поверхность [6], претендует на наибольшую достоверность из известных. По данным МС «Темрюк», расхождения скоростей ветра на высоте 62 м, измеренных и рассчитанных по модели (14) по данным нижнего уровня ветроизмерительного комплекса, не превышают 0,6%. Значения среднегодовых скоростей $v(h)$, рассчитанных по двухуровневым моделям и их сравнение с данными измерений на верхнем уровне ВИК (62 м) приведены в табл. 2.

Согласно результатам расчётов и сравнительного анализа двух указанных выше показателей (Δ_{62} и σ_{62}), использование двухуровневых моделей высотных профилей $v(h)$ на базе известных степенных (№1 и 2) и логарифмических (№4 и 5) моделей для расчётов на высоте 40 м и их комбинации с разными моделями для расчёта на высоте 62 м может несколько (до 3%) повысить точность моделирования средних годовых скоростей ветра. Однако достигаемая при этом точность моделирования на высоте 62 м оказывается не выше

Установленные в данной работе весьма высокие точности расчёта скорости ветра на верхнем уровне измерений на ВИК по модели №6 могут иметь практическое значение для развития методик мониторинга ветра за счёт уменьшения числа уровней измерений на ВИК

точности двухуровневого моделирования на базе модели №3 [формула (12)], разработанной в Главной геофизической обсерватории (ГГО) имени А.И. Воейкова, и заметно ниже (на 6%) одноуровневого моделирования по модели №6.

Установленные в данной работе и представленные в табл. 1 и 2 весьма высокие

точности расчёта скорости ветра на верхнем уровне измерений на ВИК по модели №6 могут иметь практическое значение для развития методик мониторинга ветра за счёт уменьшения числа уровней измерений на ВИК вплоть до одного (в случае ВИК в Темрюке — на высоте 20 м) с соответствующим уменьшением высоты мачты ВИК, количества измерительного оборудования и значительным снижением затрат на мониторинг ветра.

При этом важнейшим будет вопрос о высоте одноуровневых измерений, ответ на который определяют параметрические исследования погрешностей моделирования скоростей ветра и их сравнения с данными трёхуровневых (и более) измерений на известных ветроизмерительных комплексах. Пример реализации такого

Отличия данных моделирования одноуровневыми моделями среднегодовых скоростей ветра v [м/с] в районе Темрюка на высотах 40 и 62 м по данным ВИК на высоте 20 и 40 м от измеренных на высотах 40 и 62 м

табл. 3

Модель №:	1	2	3	4	5	6
$v_{20\text{ВИК}} \rightarrow \text{модель } v_{40}$ ($v_{40\text{ВИК}} - \text{модель } v_{40}$)/ $v_{40\text{ВИК}}, \%$	-0,28	2,70	-5,67	-9,65	-60,00	-0,43
$v_{20\text{ВИК}} \rightarrow \text{модель } v_{62}$ ($v_{62\text{ВИК}} - \text{модель } v_{62}$)/ $v_{62\text{ВИК}}, \%$	-0,94	0,94	-4,29	-1,74	-9,12	-0,54
$v_{40\text{ВИК}} \rightarrow \text{модель } v_{62}$ ($v_{62\text{ВИК}} - \text{модель } v_{62}$)/ $v_{62\text{ВИК}}, \%$	-0,58	1,30	-3,96	-1,38	-8,76	-0,25



подхода на примере ВИК в Темрюке приведён в табл. 3 с результатами сравнения данных измерений на среднем (40 м) и верхнем (62 м) уровнях среднегодовых скоростей $v(h)$ с результатами расчётов по данным ВИК на высоте 20 м по всем исследуемым одноуровневым моделям на тех же высотных уровнях.

С приближением опорного уровня моделирования (с 20 до 40 м) к моделируемой высоте (62 м) расхождения результатов моделирования с данными измерений могут как возрастать (модель №2), так и существенно уменьшаться (при использовании моделей №1, 4, 6), а авторская модель №6 обнаруживает наименьшие ($\approx 0,5\%$) погрешности моделирования по данным ВИК на высоте 20 м.

Разности [%] данных измерений на ВИК скорости ветра в Темрюке на высоте 62 м и данных одноуровневого их моделирования по средним многолетним данным измерений на ближайших к ВИК МС в Темрюке, Анапе и Тамани

табл. 4

№	Модель $v(h)$	ВИК v_{20} ВИК	МС «Темрюк»	МС «Анапа»	МС «Тамань»	Среднее	ВИК v_{40} ВИК	МС «Темрюк»	МС «Анапа»	МС «Тамань»	Среднее	ВИК v_{62} ВИК	МС «Темрюк»	МС «Анапа»	МС «Тамань»	Среднее
1	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{1/7}$	6,40	-15,4	-9,5	-16,1	-13,7	7,05	-6,60	-0,04	-7,34	-4,8	7,46	-6,06	0,54	-6,81	-4,22
2	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{1/10}$	6,40	-17,9	-11,1	-17,4	-15,5	7,05	-12,0	-4,7	-11,4	-9,4	7,46	-13,1	-6,0	-12,6	-10,6
3	$v(h_{\text{нижн}})(h/h_{\text{нижн}})^{m(V)}$	6,40	-8,8	-5,7	-13,0	-9,4	7,05	8,6	11,0	3,2	7,3	7,46	14,5	16,3	8,6	12,8
4	$(v^*/k) \ln(h/z_0), z_0 = 0,1$	6,40	-23,4	-14,9	-20,2	-19,5	7,05	-23,4	-14,9	-20,2	-19,5	7,46	-22,3	-13,7	-19,1	-18,4
5	$(v^*/k) \ln(h/z_0) + \beta h, z_0 = 0,1$	6,40	-20,9	-12,3	-17,7	-17,0	7,05	-18,3	-9,8	-15,2	-14,5	7,46	-14,9	-6,3	-11,8	-11,0
6	$\alpha \ln(1 + \beta h), \alpha = 1 \text{ м/с}$	6,40	-13,6	-8,8	-15,2	-12,7	7,05	-3,8	1,1	-5,4	-2,8	7,46	-3,2	1,3	-4,8	-2,3

Сравнение точности моделирования скорости ветра по данным ВИК с моделированием по многолетним данным метеостанций

Методологически и практически важным для ветроэнергетики является вопрос о принципиальной возможности и достоверности моделирования профиля скоростей ветра $v(h)$ по данным МС, ближайших к предполагаемому месту установки ВЭУ или ВЭС. В прояснение этого вопроса авторами проведено моделирование скоростей ветра на высоте 62 м по данным измерений на ближайших к ВИК МС в Темрюке, Анапе и Тамани, находящихся в прибрежном районе в примерно однотипных условиях рельефа и подстилающей поверхности (табл. 4) и их сравнение с данными измерений на ВИК.

Согласно расчётам, наибольшие расхождения данных измерений и моделирования имеют место при моделировании скоростей ветра на высоте 20 м и уменьшаются при моделировании на высоте 40 и 62 м. При этом наименьшие погрешности на высоте 62 м достигаются при использовании модели №6 и составляют значения от +1,3% при моделировании по данным МС Анапы до -3,2 и -4,8% по данным МС в Темрюке и Тамани соответственно и -2,3% по средним зна-

чениям скорости ветра по данным трёх станций. Причинами погрешностей могут являться разные периоды и сроки измерений на ВИК и МС и разные условия рельефа и подстилающей поверхности в местах расположения МС и ВИК. Более достоверное статистическое подтверждение возможности достаточно точного для практики моделирования высотного профиля скорости ветра $v(h)$ по данным МС требует совместного использования при моделировании данных ВИК с ежесуточными восемью срочными данными МС за одинаковый период измерений.

Заключение

Использование накопленных в России данных мачтовых многоуровневых измерений ветра на ВИК является ценной информационной базой для получения новых знаний о пространственной и вре-

менной структуре, энергетических спектрах ветра и толщинах вытеснения скорости и импульса ветра в приземном слое атмосферы (до 100–200 м).

В данной статье дан анализ и уточнена роль наиболее важных факторов, определяющих погрешности и саму возможность моделирования и прогнозирования характеристик ветра, в числе которых такие параметры, как периоды осреднения, годовая и суточная изменчивость, наличие высотной изменчивости.

Развитые и представленные в статье методы анализа данных ВИК представляют научный, методический и практический интерес для развития и применения новых высокоточных методик расчёта и краткосрочного прогнозирования параметров ветра на территории Российской Федерации при решении актуальных задач авиации, ветроэнергетики, высотного строительства, экологии. ●

Приведённые в статье методы анализа данных ВИК представляют практический интерес для развития и применения новых высокоточных методик расчёта и краткосрочного прогнозирования параметров ветра на территории России



1. РД 52.04.275–89. Методические указания по проведению изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок / М.М. Борисенко, А.Д. Дробышев, В.П. Харитонов [и др.]. — М.: ГТО им. А.И. Воейкова, 1989. 135 с.
2. IEC 61400-1:2019. Wind energy generation systems — Part 1: Design requirements. Edition 4.0. Publ.: February 8, 2019.
3. Petersen E.L., Troen I. European Wind Atlas. Published for the Commission of the European Communities by Risø National Laboratory. Roskilde, Denmark. 1989. 656 p.
4. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: «Атмограф», 2008. 584 с.
5. Гамова А.А., Николаев В.Г. Погрешности определения мощности ветроэнергетических установок по данным измерений метеопараметров на ветроизмерительных комплексах // Журнал СОК. 2024. №11. С. 70–75.
6. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.В. К развитию моделей высотного профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2018. Т. 54. №2. С. 147–159.
7. Гамова А.А. Повышение эффективности методики проектирования ветроэнергетических станций по данным мачтовых ветроизмерительных комплексов и метеостанций / Молодой учёный: Сб. трудов VI Межд. науч.-иссл. конкурса (02–05.10.2022). — Пенза: НТО «Наука и просвещение», 2022. С. 24–28.

References — see page 80.

Towards the development of wind monitoring techniques for wind power. Pp. 70–75.

Vladimir G. Nikolaev, PhD, corresponding member of the Russian Academy of Engineering (RIA), Director of the “Atmograph” Research & Information Center” Autonomous Non-profit Organization; **Anastasia A. Gamova**, postgraduate student, “VIM Federal Scientific Agroengineering Center” Federal State Budgetary Scientific Institution (FSBI “FNATs VIM”)

1. RD 52.04.275–89 [The Guidance Document of the Industry No. 52.04.275–89]. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniju izyskatel'skikh rabot po otsenke vetrojenergeticheskikh resursov dlja obosnovanija shem razmeshchenija i proektirovanija vetrojenergeticheskikh ustanovok* [Guidelines for conducting survey work to assess wind energy resources to justify the layout and design of wind turbines]. Developers: M.M. Borisenko, A.D. Drobyshev, V.P. Khartontov [et al.]. Moscow. GGO im. A.I. Voejkova [Voeikov Main Geophysical Observatory]. 1989. 135 p. [In Russian]
2. IEC 61400-1:2019. Wind energy generation systems — Part 1: Design requirements. Edition 4.0. Publ.: February 8, 2019.
3. E.L. Petersen, I. Troen. European Wind Atlas. Published for the Commission of the European Communities by Risø National Laboratory. Roskilde, Denmark. 1989. 656 p.
4. V.G. Nikolaev, S.V. Ganaga, Ju.I. Kudrjashov. *Natsional'nyj kadastr vetrojenergeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy ikh opredelenija* [National inventory of wind energy resources of Russia and methodological principles for their determination]. Moscow. “Atmograf” [“Atmograph” Research & Information Center” Autonomous Non-profit Organization]. 2008. 584 p. [In Russian]
5. A.A. Gamova, V.G. Nikolaev. *Pogreshnosti opredelenija moshchnosti vetrojenergeticheskikh ustanovok po dannym izmerenij meteoroparametrov na vetroizmeritel'nykh kompleksakh* [Errors in determining the capacity of wind turbines based on measurements of meteorological parameters at wind measuring complexes]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 11. Pp. 70–75. [In Russian]
6. V.G. Nikolaev, S.V. Ganaga, Ju.I. Kudrjashov, V.V. Nikolaev. *K razvitiyu modelej vysotnogo profilya skorosti vetra v prizemnom sloe atmosfery* [On the development of models of the vertical profile of wind speed in the surface layer of the atmosphere]. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series: Physics of the atmosphere and ocean]. 2018. Vol. 54. No. 2. Pp. 147–159. [In Russian]
7. A.A. Gamova. *Povyshenie jeffektivnosti metodiki proektirovanija vetrojenergeticheskikh stancij po dannym mactovykh vetroizmeritel'nykh kompleksov i meteostancij* [Improving the efficiency of the methodology for designing wind power plants based on data from mast wind measurement complexes and meteorological stations]. *Molodoj uchenyj: Sb. trudov VI Mezhd. nauch.-issl. konkursa (02–05.10.2022)* [Coll. vol. of the VI International research competition “Young Scientist” (October 2–5, 2022)]. Penza. NTO “Nauka i prosveshchenie” [“Science and education” Scientific and Creative Society]. 2022. Pp. 24–28. [In Russian]