

УДК 621.311.24:303.094

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА НА ПЛОЩАДКЕ ВЕТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА УСТЬ-КАРА

Г.В. Дерюгина, И.С. Ищенко, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Исследуется применимость теоретического распределения Вейбулла и эмпирических моделей вертикального профиля ветра на высоту. Применимость оценивается сравнением модельных повторяемостей скорости ветра с фактическими данными ветроизмерительного комплекса (ВИК).

Ключевые слова: ветроизмерительный комплекс (ВИК); вертикальный профиль ветра; эмпирическая модель; повторяемость скорости ветра; ветроэнергетическая установка (ВЭУ).

THE STUDY OF EMPIRICAL RELATIONSHIPS OF VERTICAL WIND PROFILE AT THE SITE WIND MEASURING COMPLEX UST-KARA

G.V. Deriugina, I.S. Ishenko, T.A. Shestopalova, V.A. Yurikov

The applicability of the Weibull distribution in theory and empirical models of the vertical profile of the wind to a height is investigated. The applicability of the model is estimated in comparison with repeatability of wind speed to actual data of wind measuring complex (WC).

Key words: wind measuring complex (WC); the vertical wind profile; empirical model; the frequency of wind speed; wind power unit (WPU).

Особенностью обоснования параметров ветро-электрических установок (ВЭУ) на ранних стадиях проектирования является отсутствие надежной информации о ресурсах ветра в точке, в особенности на разных высотах. Этот недостаток частично компенсируется различными методами восстановления данных с помощью математических моделей. В данной работе исследуется применимость теоретического распределения Вейбулла и эмпирических моделей вертикального профиля ветра из СБД “Вертикальный профиль ветра” для поднятия повторяемости скорости ветра на высоту. Применимость оценивается сравнением модельных повторяемостей скорости ветра с фактическими данными ветроизмерительного комплекса (ВИК).

Наиболее распространенный метод поднятия $t(V)$ по высоте – моделирование известными теоретическими распределениями, в частности, распределением Вейбулла [1]. Этот метод был рассмотрен при построении вертикального профиля ветра на площадке ВИК, расположенного в поселке Усть-Кара (69°15'5.05" с.ш., 64°55'44.50" в.д.). Оценку точности моделирования проводили сравнением с фактическими значениями $t(V)$, полученными в результате статистической обра-

ботки 10-минутных значений рядов наблюдений (с 27.04.2012 по 05.02.2013 г.) на площадке ВИК.

Теоретическое распределение Вейбулла имеет следующий вид:

$$f(u) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{u}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{\beta}\right)^\gamma\right], \quad (1)$$

где γ – безразмерный коэффициент, а β – коэффициент с размерностью скорости.

Известны различные методы определения параметров (γ и β) распределения Вейбулла [1, 2]. В данной работе определение параметра γ распределения Вейбулла производили по эмпирической формуле Гарцмана [2]:

$$\gamma = C_V^{-1,069}. \quad (2)$$

Определение параметров Вейбулла осуществляли по фактическим повторяемостям скорости ветра (рисунок 1), полученным по данным измерений скорости на ВИК на высотах установки измерительных датчиков: 10, 24 и 32 м.

Анализ исходных данных на площадке ВИК позволил выявить рост и дальнейшее выравнивание коэффициента γ с увеличением высоты (12,3 %).

Расхождения фактических повторяемостей скорости ветра на разных высотах с теоретическими по распределению Вейбулла оценивали для двух вариантов изменения по высоте параметра γ : $\gamma = var$, определенными по фактическим повторяемостям скорости ветра по формуле (2); $\gamma = const$, принятыми постоянными по высоте и равными значению γ , определенному по фактической повторяемости скорости для высоты 10 м. Точность моделирования оценивали по среднеквадратичному отклонению, определяемому по формуле:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_0)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

а также относительными отклонениями между фактическими и теоретическими повторяемостями $t(V)$ для каждой градации, особенно, попадающих в зону рабочих скоростей ВЭУ (рисунки 2, 3).

Было выявлено, что с ростом высоты при моделировании теоретическим распределением Вейбулла при $\gamma = var$ среднее значение относительного отклонения фактических повторяемостей от теоретических внутри градаций существенно не меняется, и относительные отклонения не превышают 15 %. При принятии $\gamma = const$, среднее значение относительного отклонения фактических повторяемостей от теоретических внутри градаций увеличивается (до 20 %). Для теоретического распределения Вейбулла при $\gamma = const$ также характерен рост среднеквадратичного отклонения по сравнению с фактическими значениями.

Таким образом, можно сделать вывод, что поднятие повторяемости скорости ветра на высоту с использованием теоретического распределения Вейбулла при значении $\gamma = const$, приводит к возникновению значительной погрешности в оценке ветроэнергетических ресурсов в точке, и существенно влияет на определение выработки ВЭУ.

Метод поднятия повторяемости скорости ветра на высоту по степенной зависимости вертикального профиля ветра применяли при определении показателя Хеллмана по эмпирической зависимости от средней скорости ветра на высоте 10 м для аэрологической метеостанции (АМС), аналога из специализированной базы данных (СБД) "Вертикальный профиль ветра" [3].

Выбор АМС аналога к рассматриваемой площадке ВИК осуществляли по двум критериям: близости расположения и идентичности формирования ветра на площадке ВИК и АМС на высоте 10 м. Ближайшими к площадке ВИК оказались две АМС: Нарьян-Мар (удаленность 515 км) и Салехард (310 км).

Оценку общих закономерностей формирования скорости ветра на площадках АМС и ВИК производили сравнением годовых вариаций средне-

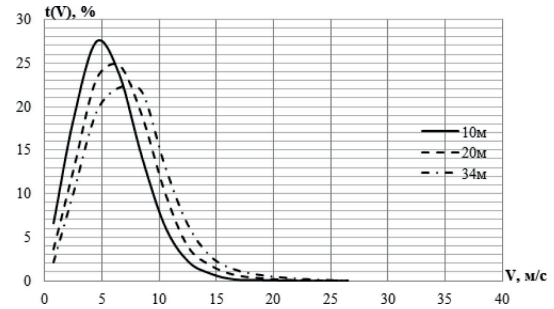


Рисунок 1 – Повторяемости скорости ветра на разной высоте ВИК

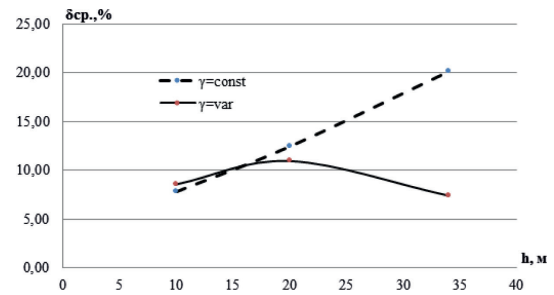


Рисунок 2 – Изменение по высоте среднего относительного отклонения теоретических повторяемостей скорости по распределению Вейбулла (при $\gamma = const$ и $\gamma = var$) от фактических на площадке ВИК Усть-Кара

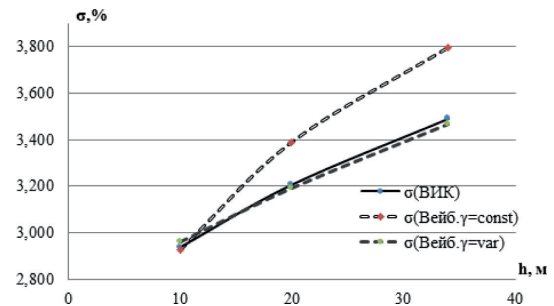


Рисунок 3 – Изменение по высоте среднеквадратичного отклонения теоретических распределений Вейбулла (при $\gamma = const$ и $\gamma = var$) от фактических на площадке ВИК Усть-Кара

сечных значений скорости ветра на высоте 10 м. Поскольку средний уровень ветра на площадках ВИК и АМС неодинаков, то при сопоставлении данных рассматривали относительный годовой ход K_i (рисунок 3), определяемый по формуле:

$$K_i = \bar{V}_i / \bar{V}_0, \quad (4)$$

где \bar{V}_i – среднемесячные скорости ветра для среднееголетнего года на площадке АМС и периода наблюдений на площадке ВИК; \bar{V}_0 – средняя скорость ветра за период наблюдений.

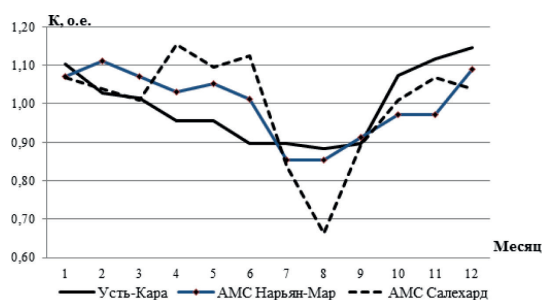


Рисунок 4 – Годовые вариации скорости ветра для АМС-аналогов и площадки ВИК Усть-Кара

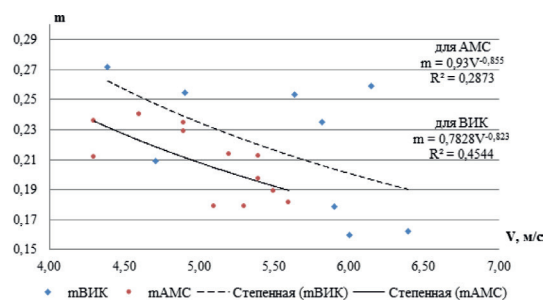


Рисунок 5 – Зависимости $m_i(V_i)$ на площадке ВИК Усть-Кара и АМС Нарьян-Мар

Таблица 1 – Анализ погрешности подъема скорости ветра по высоте при использовании эмпирической зависимости АМС-аналога

Параметры	5	6	7	8	9	10	11	12	1	Среднее	min	max
$V_{ВИК10м}^{факт}$	5,8	5,9	6,0	6,4	4,7	4,9	5,6	6,2	4,4	5,6	4,4	6,4
$V_{ВИК34м}^{факт}$	7,5	7,3	7,3	7,7	6,1	6,9	7,8	8,6	6,6	7,3	6,1	8,6
$V_{ВИК34м}(m_i(V_i))$	7,3	7,4	7,5	7,9	6,2	6,6	7,1	7,6	5,8	7,0	5,8	7,9
$\delta(V)(m_i(V_i)), \%$	2,76	1,26	2,28	1,84	0,44	7,81	8,81	11,44	11,0	5,29	0,44	11,44
$m_{ВИК}$	0,24	0,18	0,16	0,16	0,21	0,25	0,25	0,26	0,27	0,22	0,16	0,27
$m_{АМС}(m_i(V_i))$	0,18	0,18	0,18	0,17	0,22	0,21	0,19	0,18	0,23	0,19	0,17	0,23
$\delta(m)(m_i(V_i)), \%$	21,90	1,44	12,23	4,77	4,64	16,86	25,47	32,25	14,7	14,92	1,44	32,25

Годовой ход в виде среднемесячных значений скорости ветра на площадке АМС $\bar{V}_i^{АМС}$ представлен в СБД “Вертикальный профиль ветра”, а в условиях точки ВИК $\bar{V}_i^{ВИК}$ рассчитывается, как среднее арифметическое значение всех скоростей в каждом месяце за период наблюдения (рисунок 4).

В качестве АМС-аналога была выбрана АМС Нарьян-Мар, поскольку было выявлено, что динамика изменения годовой вариации среднемесячной скорости ветра на площадках АМС Нарьян-Мар и ВИК идентична: незначительные отклонения среднемесячной скорости ветра, не превышающие 10 %, наблюдаются только в период с 4 по 6 и с 10 по 11 месяцы.

По фактическим данным ВИК на разной высоте были определены среднемесячные показатели Хеллмана и предпринята попытка построить эмпирическую зависимость $m_i(V_i)$ этих показателей от среднемесячной скорости ветра на высоте 10 м. Расчет показателя m_i проводили по формуле:

$$m = \log_{h_2/h_1} \frac{V_{h_2}}{V_{h_1}}, \quad (5)$$

где V_{h_1} и V_{h_2} – скорость ветра на высотах h_1 и h_2 над поверхностью земли; m – степенной показатель (коэффициент Хеллмана).

Было проведено сравнение эмпирических зависимостей $m_i(V_i)$ ($i = 1, \dots, 12$ – номер месяца) на площадках АМС-аналога и ВИК (рисунок 5) и выявлено, что характер зависимостей идентичен.

Следовательно, для подъема скорости ветра по высоте на площадке ВИК допустимо использовать эмпирическую зависимость, полученную по данным АМС-аналога (6)

$$m = 0,7828 \cdot V^{-0,823}. \quad (6)$$

При проведении анализа погрешностей (таблица 1), возникающих при использовании эмпирической зависимости $m_i(V_i)$ АМС-аналога на площадке ВИК было определено, что среднее отклонение среднемесячных скоростей составило $\delta(V)_{cp} = 5,29 \%$, а средняя скорость за период отличается от фактических данных на $\delta(V_0) = 4,1 \%$.

Литература

1. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития ветроэнергетики в России / В.Г. Николаев. М.: АТМОГРАФ, 2011.
2. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
3. Васильев А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012620870. Специализированная база данных “Вертикальный профиль ветра”.