

ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ (05.14.08)

УДК 621.311.26

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-35-42

Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка

Г.В. Дерюгина, Д.А. Чернов, М.Г. Тягунов, Н.В. Алиходжина

Описаны две модели вертикального профиля ветра (ВПВ), представляющие эмпирические зависимости средних значений показателя степени от средних значений скорости ветра на минимальной высоте измерений ветроизмерительных комплексов (ВИК).

Модели ВПВ разработаны в результате систематизации и обобщения рядов срочных наблюдений с десятиминутным осреднением скорости ветра на минимальной и максимальной высотах измерений четырех ВИК полуострова Камчатка. Эмпирические зависимости (модели ВПВ) применимы для моделирования средней скорости ветра на произвольную высоту до 100 м для разных интервалов осреднения исходных данных (месяц, 1 ч, 10 мин) на территориях, аналогичных по физико-географическим условиям (рельеф и шероховатость местности, тип водных поверхностей: река, внутреннее или внешнее море и т.д.) четырем площадкам ВИК Камчатки. Основную ценность для последующего применения представляет вторая модель, позволяющая моделировать на произвольную высоту среднюю скорость ветра за короткие интервалы времени (от 10 минут до нескольких часов), что актуально при проектировании ветроэлектрических установок (ВЭУ), предназначенных для работы в малых локальных энергосистемах (ЛЭС). При ее построении помимо физико-географических условий местности учитывали турбулентность ветра. Для этого были разработаны эмпирические и аппроксимирующие зависимости средней интенсивности турбулентности на минимальной высоте измерений четырех ВИК от средней скорости ветра по грациям (с шагом 1 м/с).

Описаны методики, критерии верификации и аппроксимации, принятые допущения, в соответствии с которыми разрабатывали модели ВПВ. В качестве величины достоверности аппроксимации эмпирических зависимостей взят коэффициент детерминированности R^2 . Верификацию разработанных моделей ВПВ проводили в соответствии с критерием: относительное отклонение сравниваемых средних значений скорости на максимальной высоте измерений ВИК, рассчитанных по фактическим рядам наблюдений на ВИК и по модельным, за рассматриваемый интервал не должно превышать допустимой погрешности измерения скорости на ВИК (0,1 м/с). Анализ влияния выбранной модели ВПВ на проектную выработку электроэнергии одиночной ВЭУ выполнен только для одной площадки ВЭУ, совпадающей с площадкой ВИК «Усть-Камчатск». Для других площадок ВИК исследования не проводились в связи с отсутствием эксплуатационных данных ВЭУ. Показано, что при выборе модели ВПВ важно учитывать интервал осреднения исходных данных.

Ключевые слова: скорость ветра, степенная функция, вертикальный профиль ветра, коэффициент Хеллмана, математическая модель, ветроэлектрическая установка.

Для цитирования: Дерюгина Г.В., Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Алиходжина Н.В. Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 35—42. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-35-42.

Wind Shear Profile Models Derived from the Kamchatka Peninsula Meteorological Masts Data

G.V. Deryugina, D.A. Chernov, M.G. Tyagunov, N.V. Alikhodzhina

The article describes two wind shear profile (WSP) models constructed in the form of empirical dependencies of the Hellman exponent mean values from the wind speed at the minimal met mast measurement height.

The WSP models were developed using the wind speed observation series with 10-min averaging intervals obtained for the minimum and maximum measurement heights from four met masts in the Kamchatka Peninsula, which were then subjected to generalization and putting in a

systematic order. The empirical dependencies (WSP models) are applicable for modeling the average wind speed at any height up to 100 m for different source data averaging intervals (month, hour, 10 min) in territories similar to the four met mast sites on the Kamchatka Peninsula in physical and geographical conditions (terrain relief and roughness, and type of water surfaces: river, internal or external sea, etc.).

The second model seems to be of special value for further application due to its ability to model the average wind speed for short intervals of time (from 10 min to several hours) to any height, a feature that is of importance in designing wind power plants (WPPs) intended for operation in small local power systems (LPS). In developing this model, the wind turbulence was taken into account in addition to the terrain physical and geographical conditions. To this end, empirical and approximating dependences of the average turbulence intensity from the average wind speed in gradations (at 1 m/s steps) at the minimum measurement height of four met masts were developed.

The article describes the methods, verification and approximation criteria, and adopted assumptions based on which the WSP models were developed. The determinacy coefficient R^2 was taken as the empirical dependence approximation validity indicator. The developed WSP models were verified in accordance with the criterion of relative deviation of the compared average wind speed values at the met mast maximum measurement height calculated from the actual series of data observed on met masts and using the modeled data, which should not exceed the permissible speed measurement error on the met mast (0.1 m/s) for the considered interval.

The effect the selected WSP model has on the design power output produced by a single WPP was analyzed only for one WPP site that coincides with the Ust Kamchatsk met mast site. Investigations for other met mast sites were not performed due to lack of WPP operational data. It is shown that the source data averaging interval should duly be taken into account in choosing the WSP model.

Key words: wind speed, exponential function, wind shear profile, Hellman exponent, mathematical model, wind power plant.

For citation: Deryugina G.V., Chernov D.A., Tyagunov M.G., Alikhodzhina N.V. Wind Shear Profile Models Derived from the Kamchatka Peninsula Meteorological Masts Data. MPEI Vestnik. 2019;1:35—42. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-35-42.

При проектировании ветроэлектрических станций (ВЭС) и энергокомплексов на их основе немаловажное значение приобретает совершенствование методов автоматизации ветроэнергетических расчетов (ВЭР) по исходным данным из различных специализированных баз данных (СБД): «Погода России», «Расписание Погоды», «NASA» и др., в которых содержится информация о скорости, направлении ветра и других метеопараметрах для различных регионов мира. В СБД «Погода России» и «Расписание Погоды» представлены ряды срочных наблюдений указанных параметров с разным интервалом наблюдений Δt (от 3 до 8 ч), полученные на основе прямых измерений на существующих наземных метеостанциях (МС) на высоте 10 м. В СБД «NASA» приведены осредненные данные (средние значения скорости, повторяемости скорости и направления ветра и т. д.) на высоте 50 м по данным спутниковых наблюдений [1].

Все ВЭР должны соответствовать высоте установки ветроколеса (ВК) ВЭУ, которая для подавляющего большинства ВЭУ, работающих в объединенных энергосистемах, располагается на высотах 60...110 м, а для ВЭУ, работающих в децентрализованных локальных энергосистемах (ЛЭС) с пиковой мощностью до 1 МВт, соответственно — 30...50 м. С учетом этого наиболее актуально располагать моделями пересчета скорости ветра с высоты 10 м на произвольную высоту до 110 м, на которой надежная информация по ветровым ресурсам может быть получена при помощи измерений на ветроизмерительных комплексах (ВИК), местоположение которых выбирают на ранних стадиях проектирования.

На сегодняшний день в мировой практике отсутствует единая методика пересчета скорости ветра по высоте. Большинство известных в мире математических моделей восстановления данных по ветру основаны на эмпирических формулах и коэффициентах,

справедливых только на конкретной территории с ее особенностями. Как показали результаты исследований, проведенных в разных странах мира, применение их для других территорий с иными климатическими и ландшафтными условиями приводит к существенной погрешности (до 100% и выше) расчета энергетических характеристик ветра, что в дальнейшем существенно влияет на выбор и обоснование параметров и режимов работы ВЭУ и ВЭС [2—7].

Модели вертикального профиля ветра

Изменение скорости ветра по высоте зависит от множества факторов и обычно моделируется степенной или логарифмической формулами. В отечественных [1 — 3, 5] и зарубежных [8 — 10] работах показано, что профили ветра в слое атмосферы до 150 м точнее описываются степенной формулой, чем логарифмической, поэтому для разработки моделей вертикального профиля ветра (ВПВ) была выбрана степенная функция

$$\frac{V^{h_2}}{V^{h_1}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (1)$$

где V^{h_1} , V^{h_2} — средние скорости ветра за разные интервалы времени (рассмотрены интервалы осреднения 10 мин и месяц) на произвольной высоте h_2 и h_1 над поверхностью земли в рассматриваемой точке; m — осредненный показатель степени (в мировой литературе по ветроэнергетике называется коэффициентом Хеллмана).

Показатель m зависит от тех же факторов, что и скорость ветра: стратификации атмосферы, турбулентности, местных физико-географических условий (географического положения, рельефа местности, наличия и типа водных поверхностей: река, внутреннее или внешнее море и т.д.) и т. д. В настоящее время в отечественных [1, 3—5, 11] и зарубежных [8—10, 12] источниках отсутствует единая методика его опреде-

ления. Так, при составлении ветрового атласа США осредненный показатель степени принимался равным $1/7$ [9]. Согласно п. 6.3.1 [13], для стандартных классов ВЭУ нормальный профиль среднесуточной скорости ветра определяется по степенному закону и показатель степени рекомендуется принимать равным 0,2. Тем не менее он, в зависимости от местных физико-географических условий, как показано в [1 — 10, 12, 14, 15], может меняться от 0,1 до 0,5. Таким образом, в настоящее время не существует унифицированной методики или модели, отраженной в государственных стандартах, позволяющей пересчитывать скорость ветра на произвольную высоту.

В большинстве известных сегодня в мире и России математических моделях и методах аппроксимации ВПВ используются средние скорости ветра за интервалы времени не менее 1 мес. Впервые среднемесячные значения параметра m были определены для территории ФРГ и предложены эмпирические формулы, позволяющие оценить внутригодовую изменчивость среднемесячного параметра m [15]. Аналогичные исследования выполнены в 2012 г. на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ» для территории России [6, 7, 11]. По среднемесячным значениям скорости ветра на двух высотах 10 и 100 м за период с 1970 по 1980 гг. из [16] рассчитаны среднемесячные значения параметра m_l (l — номер месяца) по (1) на площадках 145-ти аэрологических станций (АМС) Российской Федерации и стран СНГ. На основе эмпирических данных (среднемесячных показателей степени и скорости ветра) разработаны эмпирические формулы, позволяющие определять среднемесячные показатели m_l от среднемесячных значений скорости ветра на высоте 10 м V_l^{10} [11]. Полученные эмпирические зависимости позволяют моделировать среднемесячную скорость ветра на произвольную высоту до 100 м от поверхности земли на площадках, аналогичных по физико-географическим условиям площадкам АМС и расположенных от АМС в радиусе 500...700 км с погрешностью, не превышающей 10% [7, 11]. Данные формулы можно также применять для восстановления скорости ветра для высот до 200 м, что обосновано в [14]. Установлено, что при аппроксимации ветровых профилей степенной функцией показатель степени m почти одинаков для 100- и 200-метрового слоев (различия не превышают 10% самой величины m). Существенным недостатком вышеописанных моделей является их неприменимость при проектировании ВЭУ, предназначенных для работы в малых локальных энергосистемах (ЛЭС), для которых требуются данные по скорости ветра за расчетные интервалы не более 1 ч. Построение моделей ВПВ для малых интервалов времени возможно по данным измерений на ВИК.

Преимущество данных измерений на ВИК перед аэрологическими заключается в том, что они фиксируются автоматическим регистратором данных (по

синхронным наблюдениям) однотипными приборами на всех высотах измерений ВИК. Точность измерений на ВИК выше, чем точность аэрологических методов. Недостаток таких измерений на ВИК — небольшой период наблюдений (1...2 года), к тому же проводятся они, как правило, только на предварительно выбранных площадках для установки ВЭУ. Тем не менее разработка моделей ВПВ для малых интервалов времени (10 мин и менее) возможна только с использованием данных ВИК.

При построении моделей ВПВ для малых интервалов времени, помимо физико-географических условий местности (в частности, рельефа или шероховатости), большое значение приобретает учет стратификации атмосферы и турбулентности ветра. В настоящее время нет общепринятого критерия определения классов устойчивости атмосферы, большинство исследователей пользуются классификацией по Паскуиллу [6]. Попытки учесть состояние атмосферы при разработке модели ВПВ делались в России неоднократно для разных условий [1, 4, 5]. В [4] приводится эмпирическая зависимость показателя степени m от класса устойчивости атмосферы и средней скорости для площадки МС «Обнинск».

В данной работе разработаны модели ВПВ для 10-минутных и месячных интервалов времени с использованием рядов срочных наблюдений с 10-минутным осреднением на минимальной $h_1(V_i^{h_1})$ (i — порядковый номер в ряду наблюдений) и максимальной $h_2(V_i^{h_2})$ высотах измерений четырех ВИК полуострова Камчатка (табл. 1). Были использованы следующие данные за периоды наблюдений на ВИК: средние 10-минутные скорости ветра на минимальной $V_i^{h_1}$ и максимальной $V_i^{h_2}$ высотах измерения, среднеквадратичные отклонения средней скорости за 10-минутный интервал на минимальной высоте измерения $\sigma_i^{h_1}$. В результате статистической обработки были рассчитаны среднемесячные скорости ветра на минимальной и максимальной высотах измерений ВИК:

$$V_i^{hk} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^{hk}}{n}, \quad (2)$$

где n — общее количество 10-минутных значений скорости V_i^{hk} в ряду наблюдений на ВИК в l -м месяце; k — высота измерения (h_1 — минимальная; h_2 — максимальная).

По этим данным по формуле (1) были определены средние показатели m для разных интервалов времени: для 1 года — m_0 ; для месяца — m_l ; для 10-ти мин — m_l . В качестве следующего этапа исследования решалась задача поиска связи между средними показателями m и значениями скорости ветра на минимальной высоте измерения V^{h_1} . При установлении связи между m и V^{h_1} для интервала времени в 10 мин также в качестве влияющего параметра в модели ВПВ анализировалась турбулентность.

Таблица 1

Данные по четырем ветроизмерительным комплексам Камчатского края России

Точки установки ВИК				Период наблюдений	Высоты измерения, м	
месторасположение	высота над уровнем моря	широта, °с.ш.	долгота, °в.д.		минимальная	максимальная
Палана	158	59° 5'3.00"	159°59'39.08"	04.12.2010 — 15.09.2014	11	34,0
Тиличики	75	60°25'54.79"	166° 3'47.79"	07.11.2010 — 01.08.2014		33,3
Оссора	2	59°13.909'	163°03,632'	18.02.2011 — 16.08.2013		33,3
Усть-Камчатск	15	56°15'37.09"	162°34'18.03"	23.06.2010 — 19.02.2016		34,1

В качестве величины достоверности аппроксимации взят коэффициент детерминированности R^2 , являющийся функцией квадратов отклонения эмпирических и модельных значений:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i^3 - y_i^m)^2}{\sum y_i^3^2 - \frac{(\sum y_i^3)^2}{n}}, \quad (3)$$

где y_i^3, y_i^m — эмпирическое и модельное значения переменных.

Величина R^2 меняется от 0 до 1: если она равна 1, то имеет место полная корреляция эмпирических данных с теоретической моделью или функциональная зависимость.

В работе представлены две математические модели ВПВ, представляющие эмпирические зависимости средних значений показателя степени от средних значений скорости ветра на минимальной высоте измерений ВИК, осредненные за 10 мин и месяц.

Модель № 1 ВПВ предназначена для моделирования на произвольную высоту до 100 м среднемесячной скорости ветра на территории, аналогичной по физико-географическим условиям площадке ВИК.

Модель № 2 разработана авторами и предназначена для моделирования на произвольную высоту до 100 м средней скорости ветра за короткие интервалы времени (от 10 мин до нескольких часов) на территории, аналогичной по физико-географическим условиям площадке ВИК. Она получена впервые в мире и России.

Верификация разработанных моделей ВПВ проводилась в соответствии с критерием:

$$\delta_v \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где δ_v — относительное отклонение сравниваемых средних значений скорости за рассматриваемый интервал времени,

$$\delta_v = (V_3 - V_m) / V_3 \cdot 100\%, \quad (5)$$

где V_3 — эмпирическая средняя скорость ветра по дан-

ном ВИК на максимальной высоте измерения, определяемая по (2) за расчетный интервал времени (10 мин. и месяц); V_m — модельная средняя скорость ветра за расчетный интервал времени, определяемая по соответствующей модели ВПВ на максимальной высоте измерения ВИК; $\delta_{\text{доп}}$ — допустимая погрешность измерения для сравниваемой скорости ветра V_3 , %,

$$\delta_{\text{доп}} = (\Delta V / V_3) \cdot 100,$$

где ΔV — погрешность измерения скорости (для ВИК — 0,1 м/с, для СБД «Погода России» и «Расписание Погоды» — 0,5 м/с) [7].

Было принято допущение, что допускается 10% случаев нарушения критерия (4) на площадках рассматриваемых ВИК.

Сравнение фактической выработки электроэнергии одиночной ВЭУ Komai KWT300 со значениями выработки электроэнергии, рассчитанными по модельным рядам скорости ветра на высоте ветроколеса ВЭУ (41,5 м), проводили только по данным ВИК Усть-Камчатска за период с 04.02.2016 по 31.10.2016 гг., поскольку в это время не было ограничений по работе ВЭУ со стороны оператора локальной энергосистемы (ЛЭС) п. Усть-Камчатск. Для других площадок ВИК данные исследования не проводили в связи с отсутствием эксплуатационных данных.

Модель № 1 вертикального профиля ветра

Модель строилась по эмпирическим среднемесячным значениям показателя m_i и скорости ветра на минимальной высоте измерений ВИК $V_i^{h_1}$ для четырех площадок ВИК, где, в соответствии с [17], периоды наблюдений более 1 года. Между m_i и $V_i^{h_1}$ установлена функциональная зависимость $m_i(V_i^{h_1})$ с коэффициентом детерминированности $R^2 = 0,83$ только для ВИК «Оссора» (табл. 2).

Для установления функциональной зависимости между m_i и $V_i^{h_1}$ на площадках ВИК было принято решение построить аппроксимирующие зависимости по двум эмпирическим точкам, соответствующим минимальному и максимальному значениям показателя степени m_i , т. е. в случае $R^2 = 1$ (см. табл. 2). Верификацию

Таблица 2

Таблица 4

Эмпирические зависимости $m_i(V_i^{h_1})$ модели № 1

Месторасположение ВИК	По данным ВИК		По двум точкам $R^2 = 1$
	$m_i(V_i)$	R^2	
Оссора	$m_i = 0,037V_i^{1,305}$	0,83	$m_i = 0,034V_i^{1,29}$
Палана	$m_i = 0,424V_i^{-0,56}$	0,49	$m_i = 0,306V_i^{-0,48}$
Тиличики	$m_i = 0,099V_i^{0,527}$	0,37	$m_i = 0,093V_i^{0,447}$
Усть-Камчатск	$m_i = 0,889V_i^{-0,68}$	0,40	$m_i = 0,679V_i^{-0,44}$

полученных моделей проводили в соответствии с критерием (4).

По формуле (5) определяли δ_{V_i} между эмпирическими среднемесячными значениями скорости ветра на максимальной высоте ВИК $V_i^{h_2}$ по (2) с рассчитанными значениями по первой модели (при $R^2 = 1$) $V_{ml}^{h_2}$ на площадках четырех ВИК. Процент случаев невыполнения критерия (3) на площадках представлен в табл. 3.

Таблица 3

Процент случаев превышения допустимой погрешности на площадках исследуемых ветроизмерительных комплексов

Наименование ВИК	Процент случаев превышения допустимой погрешности $\delta_{доп}$, %
Оссора	0,0
Палана	0,0
Тиличики	8,5
Усть-Камчатск	8,5

Анализ данных табл. 3 с учетом принятого допущения по нарушению критерия (4) (не более 10%) подтвердил применимость полученной первой модели на территориях, аналогичных по физико-географическим условиям площадкам ВИК.

Модель № 2 вертикального профиля ветра

В качестве модели № 2 предложена эмпирическая зависимость для 10-минутного интервала времени среднего показателя степени m_i от средней интенсивности турбулентности \bar{T} и средней скорости ветра на минимальной высоте ВИК $V_i^{h_1}$ в виде:

$$m(\bar{T}, V_i^{h_1}) = c(\bar{T})V_i^{d(\bar{T})},$$

где коэффициенты c, d определяются по разработанным авторами эмпирическим выражениям в зависимости от средней интенсивности турбулентности \bar{T} и местных физико-географических условий ВИКФ; \bar{T} можно найти по эмпирической зависимости:

$$\bar{T} = a(V_i^{h_1})^b, \tag{6}$$

где a, b — коэффициенты аппроксимации для физико-географических условий ВИК представлены в табл. 4.

Коэффициенты аппроксимации a и b для физико-географических условий четырех ветроизмерительных комплексов

Наименование ВИК	a	b	R^2
Оссора	0,302	-0,334	0,899
Палана	0,326	-0,253	0,799
Тиличики	0,366	-0,367	0,948
Усть-Камчатск	0,327	-0,337	0,913

Для получения эмпирических зависимостей по (6) для всех площадок ВИК были рассчитаны ряды интенсивности турбулентности на минимальной высоте измерений ВИК h_1

$$I_i^{h_1} = \frac{\sigma_i^{h_1}}{V_i^{h_1}}, \tag{7}$$

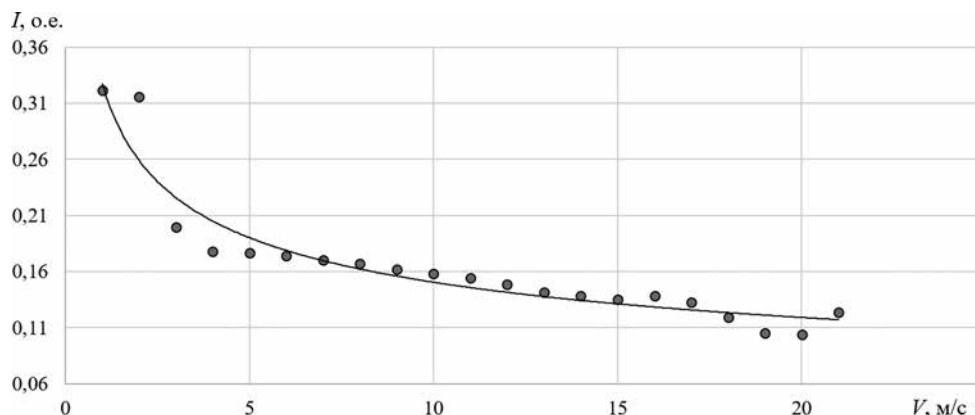
где $I_i^{h_1}$ — турбулентность за 10-минутный интервал времени, о.е.; i — порядковый номер наблюдения; $\sigma_i^{h_1}$ — среднеквадратичное отклонение средней скорости ветра $V_i^{h_1}$ за 10-минутный интервал на минимальной высоте измерения h_1 по данным ВИК, м/с.

В результате статистической обработки ряда $I_i^{h_1}$ были получены средние значения интенсивности турбулентности \bar{T} для градаций скорости ветра с шагом 1 м/с. Анализ полученных данных позволил выявить аппроксимирующие зависимости в виде степенной зависимости (7) средней турбулентности \bar{T} на минимальной высоте ВИК от средней скорости ветра по градациям с коэффициентом детерминированности R^2 не ниже 0,79 для всех площадок ВИК (см. табл. 4). На рисунке представлены эмпирическая зависимость средней интенсивности турбулентности на минимальной высоте ВИК «Усть-Камчатск» от средней скорости ветра по градациям (с шагом 1 м/с) и ее аппроксимирующая зависимость с коэффициентом детерминированности 0,91.

В качестве примера приведем эмпирические зависимости ($R^2 = 0,96$) определения коэффициентов c и d , полученные по данным ВИК «Усть-Камчатск»:

$$\begin{aligned} c(\bar{T}) &= 17,98\bar{T}^6 - 55,07\bar{T}^5 + 67,21\bar{T} - \\ &- 41,49\bar{T}^3 + 13,45\bar{T}^2 - 2,097\bar{T} + 0,549; \\ d(I) &= 164,5\bar{T}^6 + 504,2\bar{T}^5 - 601,6\bar{T}^4 + \\ &+ 350,4\bar{T} - 101,3\bar{T}^2 + 12,98\bar{T} - 0,795. \end{aligned}$$

В соответствии с (5) вычислены δ_{V_i} между фактическими 10-минутными значениями скорости ветра на максимальной высоте ВИК $V_i^{h_2,ф}$ с рассчитанными по второй модели значениями $V_i^{h_2,м}$ на площадках четырех ВИК. Процент случаев невыполнения критерия (4) на площадках рассматриваемых ВИК представлен в табл. 5.



Эмпирическая и аппроксимирующая зависимости средней интенсивности турбулентности на минимальной высоте ВИК «Усть-Камчатск» от средней скорости ветра по градациям (с шагом 1 м/с): $y = 0,3273x^{-0,337}$; $R^2 = 0,9129$

Таблица 5

Процент случаев превышения допустимой погрешности на площадках четырех ветроизмерительных комплексов

Наименование ВИК	Процент случаев превышения допустимой погрешности $\delta_{\text{доп}}$, %
Оссора	1,6
Палана	3,8
Тиличики	3,2
Усть-Камчатск	2,3

Анализ данных табл. 5 с учетом принятого допущения по нарушению критерия (4) (не более 10%) подтвердил применимость полученной второй модели на территориях, аналогичных по физико-географическим условиям площадкам ВИК.

Влияние интервала осреднения исходных данных на выбор модели вертикального профиля ветра

Сравнение фактической выработки электроэнергии одиночной ВЭУ с модельными значениями выработки электроэнергии проводилось для ВЭУ Komai KWT300 (Япония), функционирующей в составе трех установок в п. Усть-Камчатск [18, 19].

Характеристики ветроэнергетических установок фирмы Komai

Модель	KWT-300
Тип генератора	асинхронный
Мощность, кВт.....	300
Выходное напряжение, В	400
Диаметр ротора,	м 33
Система управления углом атаки лопасти	Pitch
Класс ВЭУ	ПА+
Температура эксплуатации, °С	-30...+30
Минимальная скорость ветра, м/с.....	3
Скорость выживания, м/с.....	70
Номинальная скорость ветра, м/с.....	11,5
Количество лопастей, шт.....	3

Максимальная скорость ветра, м/с..... 25
 Величина собственных нужд, кВт 22

Фактическую выработку электроэнергии ВЭУ \mathcal{E}_ϕ определим по архивным данным SCADA:

$$\mathcal{E}_\phi = \sum_{i=1}^n N_{\text{ВЭУ}_i} \Delta t_i / 6,$$

где n — количество 10-минутных интервалов времени Δt_i за период с 04.02.2016 по 31.10.2016 гг.; $N_{\text{ВЭУ}_i}$ — средняя активная мощность ВЭУ за 10-минутный интервал времени из архива данных SCADA, кВт.

Для расчета модельных значений выработки электроэнергии за период с 04.02.2016 по 31.10.2016 гг. ряд осредненных 10-минутных значений скорости ветра по данным ВИК «Усть-Камчатск» с высоты 11 м был пересчитан на высоту оси ВК (41,5 м) по (1), в которой параметр m определялся по разработанным авторами моделям ВПВ. Расчет модельных значений выработки электроэнергии одиночной ВЭУ проводили по мощностной характеристике ВЭУ фирмы Komai:

$$\mathcal{E}_m = \sum_{i=1}^n N_{\text{ВЭУ}} (V_i^{h_2}) \Delta t_i / 6,$$

где \mathcal{E}_m — модельная выработка электроэнергии одиночной ВЭУ, кВт·ч; $N_{\text{ВЭУ}}(V_i^{h_2})$ — активная мощность ВЭУ, определяемая по энергетической характеристике установки в зависимости от $V_i^{h_2}$, кВт.

Сравнение фактической выработки электроэнергии ВЭУ с модельными значениями проводилось в виде относительных отклонений $\delta_\%$ (табл. 6).

Анализ полученных результатов выявил, что расхождение между фактической и модельной выработками, рассчитанными по ряду скорости ветра, поднятому на высоту по второй модели (когда интервалы осреднения исходных и модельных данных совпадают), составляет 3,5%.

Таким образом, на ранней стадии проектирования величина проектной выработки существенно зависит не только от выбранной модели ВПВ, но и от интер-

Таблица 6

Фактическая и модельные выработки электроэнергии единичной ветроэнергетической установки Komai KWT-300 на площадке ВИК Усть-Камчатск за период с 04.02.2016 по 31.10.2016 гг.

Параметры	Фактические данные	Методы	
		первый	второй
Э, МВт·ч	498,3	597,75	480,85
δ , %	—	-19,960	3,5000

вала осреднения исходного ряда, для которого предназначена эта модель.

Выводы

Разработаны и верифицированы две модели ВПВ, применимые для разных интервалов осреднения ис-

ходных данных на территориях, аналогичных по физико-географическим условиям четырем площадкам ВИК полуострова Камчатка. Основную ценность для дальнейшего применения представляет модель № 2, позволяющая моделировать на произвольную (до 100 м) высоту среднюю скорость ветра за короткие интервалы времени (от 10 мин до нескольких часов).

Показано, что при выборе модели ВПВ важно учитывать интервал осреднения исходных данных. Наименьшее расхождение между фактической и модельной выработками получено с использованием второй модели. Следовательно, на предварительной стадии проектирования при оценке параметров ветродизельных энергокомплексов, в частности, величины замещения электроэнергии ДЭС энергией ВЭС, требуется именно модель № 2.

Литература

1. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В. Ветроэнергетика. М.: МЭИ, 2016.
2. Белокрылова Т.А. Об изменении скоростей ветра на территории СССР // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1989. № 150. С. 38—47.
3. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера: состояние, условия эффективности, перспективы. Л.: Наука, 1989.
4. Бызова Н.Л., Шнайман В.А., Бондаренко В.Н. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным // Метеорология и гидрология. 1987. № 11. С. 75—83.
5. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф, 2008.
6. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А. Исследование моделей вертикального профиля ветра на территории Дальневосточного федерального округа // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 10—11. С. 63—74.
7. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Чернов Д.А. Моделирование вертикального профиля ветра по данным аэрологических метеостанций России // Энергосбережение — теория и практика: Труды VI Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: МЭИ, 2012.
8. Wind Energy Resource Atlas of the United States. Washington: Pacific Northwest Laboratory, 1987.
9. Wegley H.L., Ramsdell J.V., Orgill M.M., Drake R.L. Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems. Richland: Battelle Pacific Northwest Labs, 1980.
10. Ellis D.W., Keenan M.G. Development of Wind Shear Models and Determination of Wind Shear Hazards. Federal Aviation Administration, Systems Research & Development Service, 1978.
11. Свидетельство № 2012620870 о гос. регистрации базы данных. Специализированная база данных

References

1. Vas'kov A.G., Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V. Vetroenergetika. M.: MEI, 2016. (in Russian).
2. Belokrylova T.A. Ob Izmenenii Skorostey Vetra na Territorii SSSR. Trudy VNIIGMI-MTSD. 1989;150:38—47. (in Russian).
3. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. Ispol'zovanie Energii Vetra v Rayonakh Severa: Sostoyanie, Usloviya Effektivnosti, Perspektivy. L.: Nauka, 1989. (in Russian).
4. Byzova N.L., Shnaydman V.A., Bondarenko V.N. Raschet Vertikal'nogo Profilya Vetra v Pogranichnom Sloe Atmosfery po Nazemnym Dannym. Meteorologiya i Gidrologiya. 1987;11:75—83. (in Russian).
5. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. Natsional'nyy Kadastr Vetroenergeticheskikh Resursov Rossii i Metodicheskie Osnovy ikh Opredeleniya. M.: Atmograp, 2008. (in Russian).
6. Vas'kov A.G., Deryugina G.V., Tyagunov M.G., Chernov D.A. Issledovanie Modeley Vertikal'nogo Profilya Vetra na Territorii Dal'nevostochnogo Federal'nogo Okruga. Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya. 2015;10—11:63—74. (in Russian).
7. Vas'kov A.G., Deryugina G.V., Chernov D.A. Modelirovanie Vertikal'nogo Profilya Vetra po Dannym Aerologicheskikh Meteostantsiy Rossii. Energoberezhenie — Teoriya i Praktika: Trudy VI Mezhdunar. Shkolyseminara Molodykh Uchenykh i Spetsialistov. M.: MEI, 2012. (in Russian).
8. Wind Energy Resource Atlas of the United States. Washington: Pacific Northwest Laboratory, 1987.
9. Wegley H.L., Ramsdell J.V., Orgill M.M., Drake R.L. Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems. Richland: Battelle Pacific Northwest Labs, 1980.
10. Ellis D.W., Keenan M.G. Development of Wind Shear Models and Determination of Wind Shear Hazards. Federal Aviation Administration, Systems Research & Development Service, 1978.
11. Svidetel'stvo № 2012620870 о Gos. Registratsii Bazy Danykh. Spetsializirovannaya Baza Danykh «Verti-

«Вертикальный профиль ветра» / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов. М.: МЭИ, 2012.

12. **Justus C., Mikhail A.** Height Variations of Wind Speed and Wind Distributions Statistics // *Geophys. Res. Lett.* 1976. No. 3. Pp. 251—264.

13. **ГОСТ Р 54418.1—2012 (МЭК 61400-1:2005).** Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Ч. 1. Технические требования.

14. **Борисенко М.М.** Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* 1974. Вып. 320.

15. **Борисенко М.М., Соколова С.Н., Корнюшин О.Г.** Исследование климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов // *Гидрометеорология и метеорология: обзорная информация.* 1987. № 4.

16. **Новый** аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1986. Т. 2.

17. **Measuring Network of Wind Energy Institutes** [Официальный сайт] <http://www.measnet.com> (дата обращения 15.08.2018).

18. **KWT300-Brochure English** [Электронный ресурс] http://www.komaihaltec.co.jp/english/renewable_energy/pdf/KWT300_Brochure10.pdf (дата обращения 15.08.2018).

19. **KWT300-Brochure English (2)** [Электронный ресурс] http://www.komaihaltec.co.jp/english/renewable_energy/pdf/KWT300_Brochure_2.pdf (дата обращения 15.08.2018).

«kal'nyy profil' vetra» / A.G. Vas'kov, G.V. Deryugina, M.G. Tyagunov, D.A. Chernov. M.: MEI, 2012. (in Russian).

12. **Justus C., Mikhail A.** Height Variations of Wind Speed and Wind Distributions Statistics. *Geophys. Res. Lett.* 1976;3:251—264.

13. **GOST R 54418.1—2012 (MEK 61400-1:2005).** Vozobnovlyayemaya Energetika. Vetroenergetika. Ustanovki Vetroenergeticheskie. Ch. 1. Tekhnicheskie Trebovaniya. (in Russian).

14. **Borisenko M.M.** Vertikal'nye Profili Vetra i Temperatury v Nizhnikh Sloyakh Atmosfery. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii im. A.I. Voeykova.* 1974;320. (in Russian).

15. **Borisenko M.M., Sokolova S.N., Kornushin O.G.** Issledovanie Klimaticheskikh Kharakteristik Vetroenergeticheskikh Resursov. *Gidrometeorologiya i Meteorologiya: Obzornaya Informatsiya.* 1987;4. (in Russian).

16. **Novyy** Aeroklimaticheskyy Spravochnik Pogranichnogo Sloya Atmosfery nad SSSR. M.: Gidrometeoizdat, 1986. T. 2. (in Russian).

17. **Measuring Network of Wind Energy Institutes** [Ofits. Sayt] <http://www.measnet.com> (Data Obrashcheniya 15.08.2018).

18. **KWT300-Brochure English** [Elektron. Resurs] http://www.komaihaltec.co.jp/english/renewable_energy/pdf/KWT300_Brochure10.pdf (Data Obrashcheniya 15.08.2018).

19. **KWT300-Brochure English (2)** [Elektron. Resurs] http://www.komaihaltec.co.jp/english/renewable_energy/pdf/KWT300_Brochure_2.pdf (Data Obrashcheniya 15.08.2018).

Сведения об авторах:

Дерюгина Галина Владимировна — старший преподаватель кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»

Чернов Дмитрий Алексеевич — аспирант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»

Тягунов Михаил Георгиевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»

Алиходжина Надежда Васильевна — студент, инженер кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: resckator@mail.ru

Information about authors:

Deryugina Galina V. — Senior Lecturer of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI

Chernov Dmitriy A. — Ph.D.-student of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI

Tyagunov Mikhail G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI

Alikhodzhina Nadezhda V. — Student, Engineer of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: resckator@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 15.01.2018

The article received to the editor: 15.01.2018