Статья поступила в редакцию 18.03.15. Ред. рег. № 2200 The article has entered in publishing office 18.03.15. Ed. reg. No. 2200

УДК 621.311.26

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
РФ 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
тел.: 8(495)362-72-51; e-mail: nvie@fee.mpei.ac.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.10-11.006

Заключение совета рецензентов: 02.04.15 Заключение совета экспертов: 29.04.15 Принято к публикации: 05.05.15

Анализируются модели вертикального профиля ветра на территории Дальневосточного федерального округа (ДФО), полученные по данным фактических наблюдений на площадках 7-ми ветроизмерительных комплексов (ВИК), и приводится их сопоставление с моделями вертикального профиля, полученными авторами по многолетним данным на площадках аэрологических метеостанций (АМС).

На примере ветроэлетростанции (ВЭС), входящей в состав локальной энергосистемы (ЛоЭС) села Новиково Сахалинской области, показана степень влияния точности определения коэффициента Хеллмана вертикального профиля ветра на ветроэнергетические характеристики и режимы работы ЛоЭС.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, ветроэлектрическая станция, вертикальный профиль ветра, коэффициент Хеллмана, распределённая энергосистема.

RESEARCH OF WIND SPEED PROFILE MODELS AT THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT, RUSSIAN FEDERATION

A.G. Vaskov, G.V. Derugina, M.G. Tyagunov, D.A. Chernov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250 Russian Federation
ph.: +7(495)362-72-51, e-mail: nvie@fee.mpei.ac.ru

Referred 2 April 2015 Received in revised form 29 April 2015 Accepted 5 May 2015

The paper analyzes the wind speed profile models at the Far Eastern Federal District (FEFD), obtained according to actual observations at sites 7 wind measurement complexes (WMC), and gives their comparison with the wind speed profile models obtained by the authors of this paper on the long-term data of aerological stations (AS).

The example of wind power plant, part of the local energy system of village Novikovo in Sakhalin region, shows the influence of the determination accuracy Hellman coefficient wind speed profile on the wind energy characteristics and local energy system operation modes.

Keywords: wind turbine, wind power station, wind speed profile, Hellman coefficient, distributed power system.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Васьков Алексей Геннадьевич
Alexey G.Vaskov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: НИУ Московский энергетический институт (2010).

Область научных интересов: управление режимами работы энергокомплексов на основе ВИЭ.

Публикации: более 20, 1 авторское свидетельство.

Information about the author: PhD, senior lecturer at the of "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (2010).

Research area: mode control of power complexes based on renewable energy.

Publications: more than 20, 1 copyright certificate.

Дерюгина
Галина Владимировна
Galina V. Derugina

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: Московский энергетический институт (1988).

Область научных интересов: разработка и обоснование параметров ветроэлектрических станций в распределённых энергосистемах.

Публикации: более 40, 3 авторских свидетельства.

Information about the author: Senior Lecturer of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: Moscow Power Engineering Institute (1988).

Research area: development and substantiation of the parameters of wind-power stations in distributed power systems.

Publications: more than 40, 3 copyright certificates.

Тягунов Михаил Георгиевич
Mihail G. Tyagunov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: Московский энергетический институт (1970).

Область научных интересов: системный анализ процессов и систем управления энергетическими объектами.

Публикации: более 98, 3 авторских свидетельства.

Information about the author: DSc (engineering), professor of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: Moscow Power Engineering Institute (1970).

Research area: system analysis of processes and management systems of energy facilities.

Publications: more than 98, 3 copyright certificates.

Чернов Дмитрий Алексеевич
Dmitry A. Chernov

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ.

Образование: НИУ Московский энергетический институт (2014).

Область научных интересов: управление режимами работы энергокомплексов на основе ВИЭ, разработка и обоснование параметров ветроэлектрических станций в энергосистемах различного типа.

Публикации: более 6, 1 авторское свидетельство.

Information about the author: Postgraduate of the "Hydropower and Renewable Energy" department.

Education: National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (2014).

Research area: mode control of power complexes based on renewable energy, development and substantiation of the parameters of wind power stations in distributed power systems.

Publications: more than 6, 1 copyright certificate.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Введение

Современная ветроэнергетика является самой интенсивно развивающейся отраслью мирового энергетического хозяйства. В XXI веке ежегодный прирост по установленной мощности ветроэлектрических станций (ВЭС) в мире составил от 12 % до 41 % в год, в первом полугодии 2014 года она достигла 336 ГВт, к концу 2014 – около 360 ГВт (рис. 1). Установлено 72 % новых ВЭС в пяти странах: Китай (~ 98 ГВт), США (~ 62 ГВт), Германия (~ 36 ГВт), Испания (~ 23 ГВт), Индия (~ 22 ГВт). Годовая выработка электроэнергии всеми ВЭС в мире на начало 2014 г. составила около 4 % от всей потребляемой электроэнергии [1].

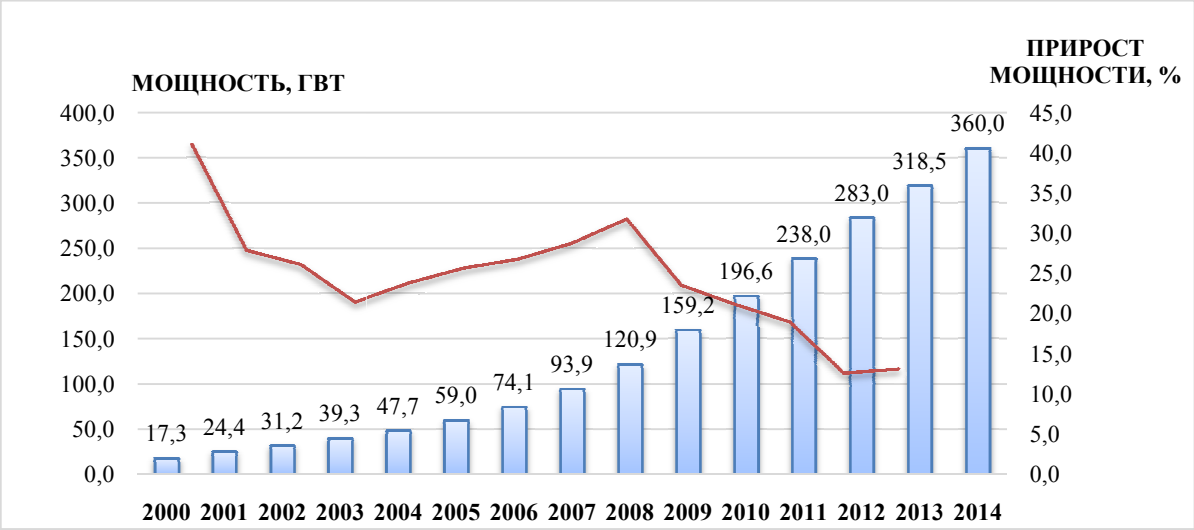

Рис. 1. Динамика суммарной установленной мощности ВЭС в мире
Fig. 1. Total installed capacity dynamics of wind power plants in the world

Россия в области освоения богатейших ветроэнергетических ресурсов (валовой потенциал $2{,}6 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год; технический потенциал $6\ 517 \cdot 10^{9}$ кВт·ч/год) сегодня занимает 69 место по установленной мощности ВЭС среди 103 стран, ведущих разработку ВЭУ, после Колумбии и Эквадора. Суммарная мощность всех ВЭС России на первое полугодие 2014 г составляет около 16,8 МВт [1].

При сооружении ВЭС и энергокомплексов на их основе немаловажное значение приобретает совершенствование методов автоматизации проектирования и ветроэнергетических расчетов (ВЭР), использующих открытые специализированные климатические базы данных (СБД).

В различных базах данных сведения о скорости ветра приведены для стандартной высоты флюгера на наземных метеостанциях (МС), чаще всего находящихся в населённых пунктах или аэропортах. Поскольку местоположение предполагаемой площадки ВЭС не всегда совпадает с местом расположения МС, то возникает необходимость восстановления данных о ветровых ресурсах с учётом ландшафтных особенностей местности по данным ближайших МС и дальнейшего их пересчёта на высоту установки ветроколеса (ВК) ветроэлектрической установки (ВЭУ). На сегодняшний день в мировой практике отсутствует единая методика пересчёта скорости ветра по высоте. Большинство известных в мире математических моделей восстановления данных по ветру основаны на эмпирических формулах и коэффициентах, справедливых только на исследуемой территории. Это требует модификации известных моделей для учета климатических и ландшафтных особенностей территории России.

Моделирование вертикального профиля ветра

Изменение скорости ветра по высоте зависит от множества факторов, таких как: шероховатость и рельеф местности, наличие искусственных и естественных препятствий, стратификация атмосферы и т.д., – и обычно моделируется степенной или логарифмической функциями [2].

Моделирование вертикального профиля ветра авторами производилось по степенной зависимости

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

где V^{h_1} и V^{h_2} – скорости ветра на высотах h_1 и h_2 соответственно; m – показатель степени Хеллмана, зависящий от скорости ветра, рельефа местности, стратификации атмосферы и т.д. Точность моделирования вертикального профиля ветра степенной функцией зависит в первую очередь от значения по-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

казателя Хеллмана m и может быть оценена только сравнением с фактическими данными наблюдений на разной высоте, полученными на ветроизмерительных комплексах или аэрологических станциях. В настоящее время в отечественных и зарубежных исследованиях отсутствует единая методика определения показателя Хеллмана m [2], в большинстве используемых методик принимается осреднённый показатель $m = 0{,}2$.

Небольшая погрешность в определении скорости ветра на высоте приводит к существенной погрешности при расчете ее удельной мощности $N_{уд}$ (Вт/м^2), по формуле:

$$N_{уд} = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^3, \qquad (2)$$

где ρ (кг/м^3) – плотность воздуха при заданной температуре воздуха t° ($^\circ$, град С) и известном атмосферном давлении P (кПа или мм рт. ст.) [2].

Авторами были проведены исследования по оценке применимости существующих зарубежных методик определения показателя Хеллмана m по среднемноголетним данным скорости ветра на высоте 10 м и 100 м, собранными 145-ю аэрологическими метеостанциями (АМС) Российской Федерации и стран СНГ. По фактическим значениям среднемноголетней скорости ветра на высоте 10 м 145-и аэрологических метеостанций по формуле (1) были рассчитаны значения среднемноголетней скорости на высоте 100 м при определении среднемноголетнего показателя Хеллмана m_0 по различным наиболее применяемым за рубежом методикам. Проведенное сравнение расчетных значений среднемноголетней скорости ветра на высоте 100 м с фактическими данными выявило: относительная погрешность расчетных значений может достигать ±50 %, что приводит к еще большей погрешности при определении удельной мощности ветровой энергии (до 300 %), и, следовательно, в дальнейшем существенно влияет на выбор и обоснование параметров и режимов работы ВЭУ. Отсюда был сделан вывод о неприменимости зарубежных методик расчета показателя m_0 для условий Российской Федерации.

Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра»

Для моделирования вертикального профиля ветра в любой точке России авторами была разработана специализированная база данных (СБД) «Вертикальный профиль ветра» [3] по информации 145-и АМС Российской Федерации и стран СНГ. Разработанное программное обеспечение СБД «Вертикальный профиль ветра» предназначено для анализа, обработки и графического отображения информации из СБД, а также подбора ближайшей аэрологической станции для любой точки России. Данная разработка широко используется в учебном процессе и научной работе кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ» и может найти применение в научно-исследовательских и проектных организациях на ранних стадиях проектирования ВЭС.

Авторский подход к определению параметров вертикального профиля ветра основан на расчётно-статистическом выявлении внутригодовой закономерности изменения многолетнего среднемесячного значения коэффициента m_l (l – номер месяца) от среднемесячной скорости ветра $\overline{V}_l$ на высоте 10 м для отдельных АМС или групп АМС, расположенных в идентичных климатических, географических и топографических условиях, в виде эмпирической зависимости

$$m_l = a\overline{V}_l^b, \qquad (3)$$

где a и b – параметры модели каждой АМС.

В СБД «Вертикальный профиль ветра» представлена следующая информация о вертикальном профиле скорости ветра:

– среднемноголетние, среднемесячные, среднечасовые значения скорости ветра за характерные часы суток (1^{00}, 7^{00}, 13^{00}, 19^{00}) на высоте 10, 100 и 200 м над землёй;

– параметры a и b модели для определения показателя степени m_l от среднемесячной скорости ветра на высоте 10 м V_l, применимые для пересчета скорости ветра в диапазоне высот от 10 м до 100 м над поверхностью земли;

– коэффициенты корреляции R между предлагаемой моделью степенного закона вертикального профиля ветра и измеренными на АМС данными: модельная зависимость $m_l(V_l)$ выражается уравнением (3) и применима для пересчёта скорости ветра с высоты 10 м на высоту до 100 м от поверхности земли при $R > 0{,}75$.

Информация, представленная в СБД «Вертикальный профиль ветра», позволяет в перспективе получить эмпирические зависимости типа (3) для пересчёта скорости ветра с высоты 100 м на высоту 200 м, что актуально для пересчета скорости ветра оффшорных ветроэлектрических станций (ВЭС).

Разработанное программное обеспечение по управлению базой данных позволяет осуществлять поиск по различным полям базы данных: по названию АМС (по названию населённого пункта, в котором она расположена) (рис. 2); номеру АМС в списке Всемирной метеорологической организации (ВМО); по географическому положению (область поиска определяется заданными пользователем географическими координатами центра и радиусом окружности, внутри которой необходимо произвести поиск). Все АМС, соответствующие поисковому запросу пользователя, заносятся в промежуточный список, из которого можно выбрать интересующую АМС и полу-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

чить по ней полную справочную информацию (название, номер по ВМО, географические координаты и высоту над уровнем моря), а также просмотреть и при необходимости скопировать значения скорости ветра на различных высотах над уровнем земли.

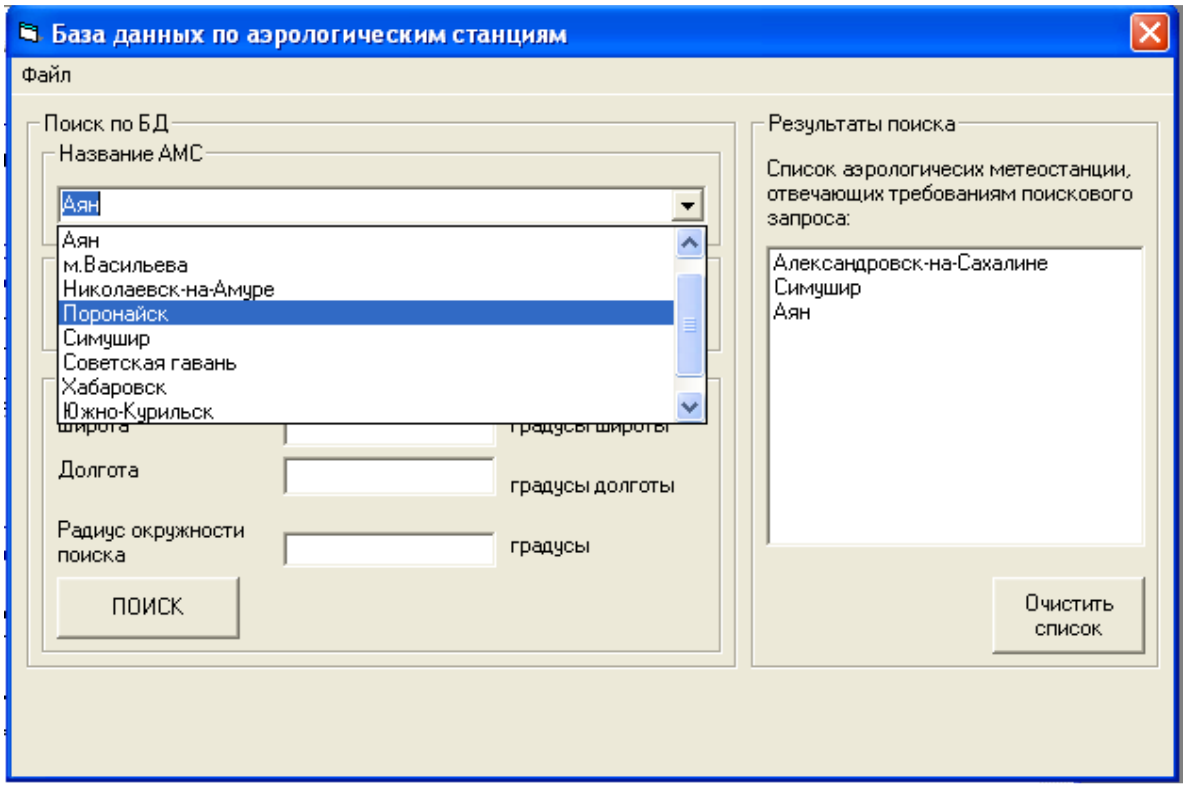

Рис. 2. Внешний вид программы управления базой данных «Вертикальный профиль ветра»
Fig. 2. Appearance of the management interface of database "Wind Speed Profile"

Анализ результатов расчетов вертикального профиля ветра в точках расположения 145-и АМС (СБД «Вертикальный профиль ветра») позволил сделать следующие выводы:

1. С ростом средней скорости ветра $\overline{V}$ снижается значение коэффициента Хеллмана m. Изменение коэффициента Хеллмана m по фактическим данным АМС находится в пределах от 0,06 до 0,8. При больших значениях скорости ветра ($\overline{V}$ > 8 м/с) он имеет тенденцию к снижению и в пределе стремится к нулю. Для равнинной и равнинно-холмистой местности коэффициент Хеллмана не превышает 0,4.

2. Расчёты по получению различных эмпирических зависимостей в идентичных топографических условиях для всех 145 АМС на территории России и по группам АМС, относящихся к 6 федеральным округам выявили:

– среднемноголетний коэффициент Хеллмана m зависит от среднемноголетней скорости ветра $\overline{V}_0$ на высоте 10 м по отдельно взятым регионам России; для отдельных регионов России были получены эмпирические зависимости среднемноголетнего коэффициента Хеллмана m_0 от среднемноголетней скорости ветра $\overline{V}_0$ (на высоте 10 м), справедливые только в условиях исследуемой территории;

– для групп АМС, расположенных на территории 4-х Федеральных округов (для остальных регионов данных для построения $m_0(\overline{V}_0)$ недостаточно, например, в Южном округе 3 АМС, в Северо-Кавказском 1 АМС) и в однотипных ландшафтных условиях были проведены расчёты с целью получения эмпирических зависимостей параметра m_o от среднемноголетней скорости ветра: для групп АМС с высотными отметками более 100 м над уровнем моря не было выявлено единой зависимости; для групп АМС в условиях равнинной (h < 10 м) и равнинно-холмистой местности (h < 50 м) эмпирические зависимости были получены (рис. 3).

– расхождение между зависимостями $m(V_0)$ (для групп АМС с высотными отметками от 10 до 100 метров) на территории 4-х Федеральных округов несущественно, следовательно, на их территории может быть применима единая эмпирическая зависимость $m = 1,284 \cdot V_0^{-0,74}$.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

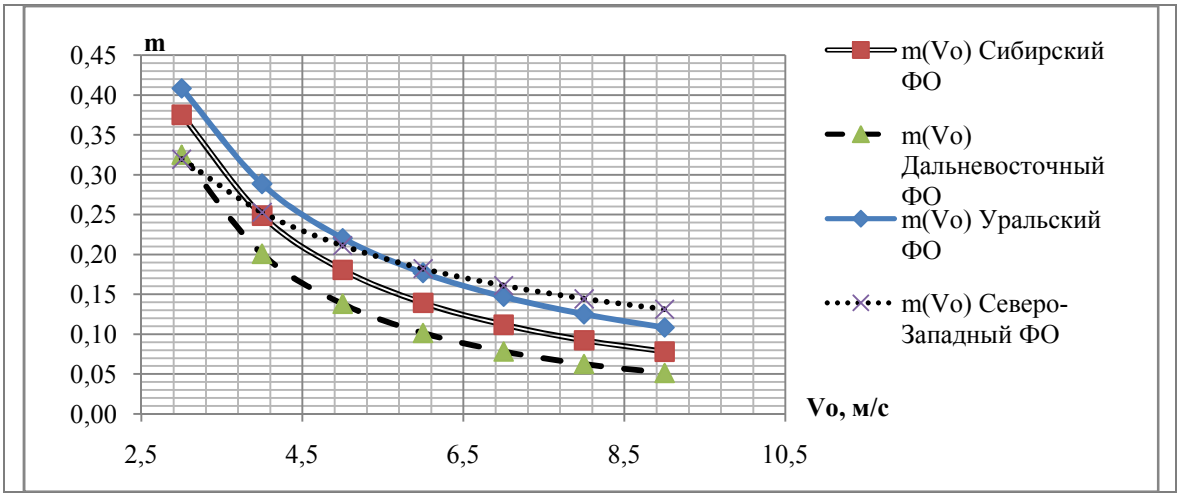

Рис. 3. Эмпирические зависимости $m\ (V_0)$ для высоты от 10 до 50 метров, полученные по данным АМС для 4-х федеральных округов

Fig. 3. Empirical dependences $m\ (V_0)$ for height range of 10 to 50 meters, obtained according to AWS data for the 4 Federal Districts

Для многих АМС (более 50 % из 145-и) было выявлено существенное внутригодовое изменение среднемесячных значений коэффициента m_l относительно среднемноголетнего (до ±200 %). Неучёт этого факта может привести к погрешности при определении среднемесячных значений скорости ветра $\overline{V}_l$ по высоте до ±50 % что, в свою очередь, влияет на точность определения среднемноголетних месячных значений выработки ВЭУ – погрешности могут составлять от –75 % до +85 %. В качестве примера на рисунке 4 показано изменение среднемесячных значений скорости ветра на высоте 100 м в месте расположения АМС Кемь-порт по фактическим данным АМС из СБД «Вертикальный профиль ветра» и полученным в результате расчета по формуле (1) с учётом внутригодового изменения $m_l(V_l) = 0,8072 \cdot V_l^{-0,75}$ и по среднемноголетнему показателю $m = 0,29$.

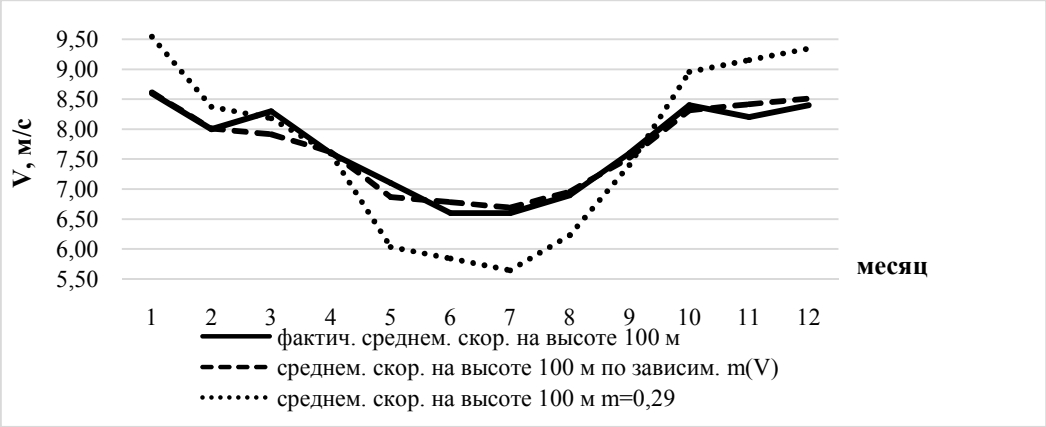

Рис. 4. Изменение среднемесячных значений скорости ветра на высоте 100 м в месте расположения АМС Кемь-порт

Fig. 4. Changing the mean monthly wind speed values at a height of 100 m at AWS Kem-port

Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов на территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) и их сопоставление с моделями СБД «Вертикальный профиль ветра»

Была предпринята попытка построить модели вертикального профиля ветра в виде зависимостей $m_l(V_l)$ по фактическим наблюдениям на площадках 7-ми ветроизмерительных комплексов (ВИК) ДФО на высоте до 50 м, которая оказалась неудачной. Коэффициенты корреляции полученных зависимостей $m_l(V_l)$ на площадках всех 7-ми ВИК не превышают 0,5. В качестве примера на рисунках 5 и 6 приведены фактические табулированные и эмпирические зависимости $m_l(V_l)$ по данным ВИК Черский и ВИК Чокурдах. Анализ годовых вариаций скорости ветра на площадках ВИК выявил их существенное отклонение от годовых вариаций среднемноголетнего года (за 12 лет), по данным которых были получены эмпирические зависимости $m_l(V_l)$ на площадках АМС

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

из СБД «Вертикальный профиль ветра». Следовательно, для получения эмпирических зависимостей $m_l(V_l)$ с хорошей корреляцией периодов наблюдений на ВИК, составляющих на разных ВИК от 1 года до 3 лет, недостаточно.

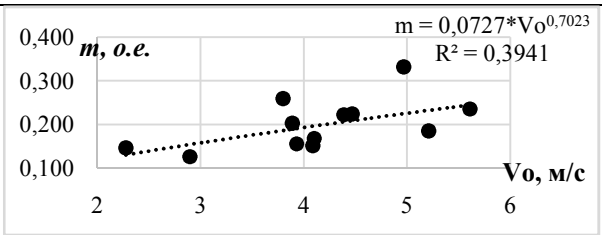

Рис. 5. Зависимость $m_l(V_l)$ по данным ВИК Черский

Fig. 5. Dependence $m_l(V_l)$ according to Cherskiy wind measuring complex data

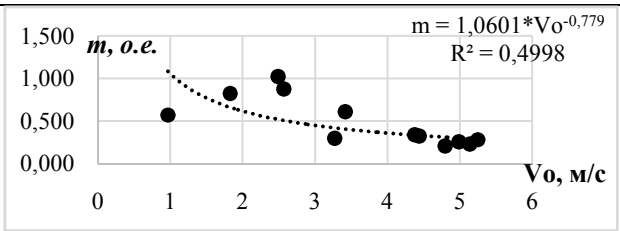

Рис. 6. Зависимость $m_l(V_l)$ по данным ВИК Чокурдах

Fig. 6. Dependence $m_l(V_l)$ according to Chokurdakh wind measuring complex data

В результате обработки данных 40-а АМС на территории ДФО из СБД «Вертикальный профиль ветра» была получена эмпирическая зависимость среднемноголетнего коэффициента Хеллмана m_0 от среднемноголетней скорости ветра $\overline{V}_0$ на высоте 10 м вида: $m_0 = 0,6827 \cdot V_0^{-0,914}$ с коэффициентом корреляции R = 0,88. Аналогично по фактическим данным 7-и ВИК ДФО была получена эмпирическая зависимость $m_0 = 0,8548 \cdot V_0^{-1,127}$ с коэффициентом корреляции R = 0,8 (рис. 7). Сравнение значений m_0, рассчитанных по приведенным выше зависимостям $m_0(V_0)$ для средних значений скорости ветра на высоте 10 м на площадках ВИК, выявило, что среднеквадратическое отклонение в 6-и случаях из 7-и не превышает 18 %. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что на предпроектных стадиях оценки среднемноголетней скорости ветра на различной высоте в регионе ДФО возможно применять эмпирическую зависимость, полученную в результате обработки данных СБД «Вертикальный профиль ветра».

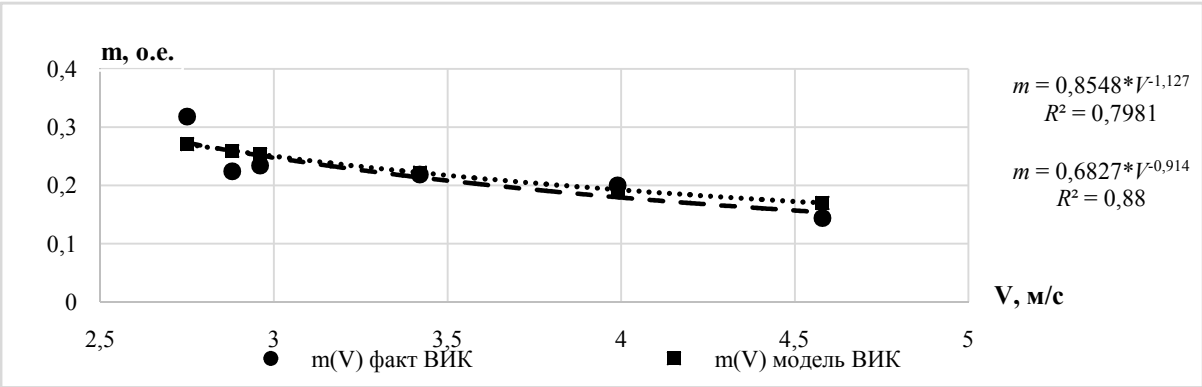

Рис. 7. Фактическая и модельная зависимости $m(V)$ для ВИК ДФО

Fig. 7. Actual and model dependence $m(V)$ for wind measuring complexes at the Far East Federal District

В настоящее время одной из проблем в ветроэнергетике является пересчет (поднятие) повторяемости скорости ветра $t(V)$ по высоте. Наиболее распространенный метод поднятия $t(V)$ по высоте – известные теоретические модели распределения, в частности наиболее распространенное распределение Вейбулла [2], которое имеет следующий вид:

$$f(u) = (\gamma/\beta)(u/\beta)^{\gamma-1} \exp\left[-(u/\beta)^{\gamma}\right], \quad (4)$$

где γ – безразмерный коэффициент; β – коэффициент с размерностью скорости. Известны различные методы определения параметров (γ и β) распределения Вейбулла [1], авторами статьи определение параметра γ производилось по эмпирической формуле Гарцмана:

$$\gamma = C_V^{-1,069}. \quad (5)$$

Этот метод был рассмотрен при построении вертикального профиля ветра на площадках 7-и ВИК ДФО. Определение параметров Вейбулла осуществлялось по фактическим повторяемостям скорости ветра, полученным по данным измерений скорости на ВИК на высотах установки измерительных датчиков.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Анализ изменения параметра γ по высоте (рис. 8) не выявил его существенного изменения, причем не была выявлена общая тенденция изменения параметра γ по высоте на площадках разных ВИК. Относительные отклонения значений параметра γ на высотах по отношению к значениям γ на высоте 10 м Δ_{10} не превысили 8 % на площадках 6-и ВИК из 7-и. Также было замечено, что в большинстве случаев (в 6 случаях из 7) параметр γ, как правило, увеличивается на максимальной высоте установки датчиков по сравнению с минимальной.

Расхождения фактических и теоретических повторяемостей скорости ветра по распределению Вейбулла на разных высотах оценивались для двух вариантов изменения параметра γ по высоте: $\gamma = \mathrm{var}$, определенных по фактическим повторяемостям скорости ветра по формуле (5); $\gamma = \mathrm{const}$, принятых постоянными по высоте и равными значению γ, определенному по фактической повторяемости скорости для высоты 10 м. Точность моделирования оценивалась по среднеквадратичному отклонению σ_t фактической повторяемости скорости ветра $t^{\text{ВИК}}(V)$ от теоретической $t^{\text{теор}}(V)$.

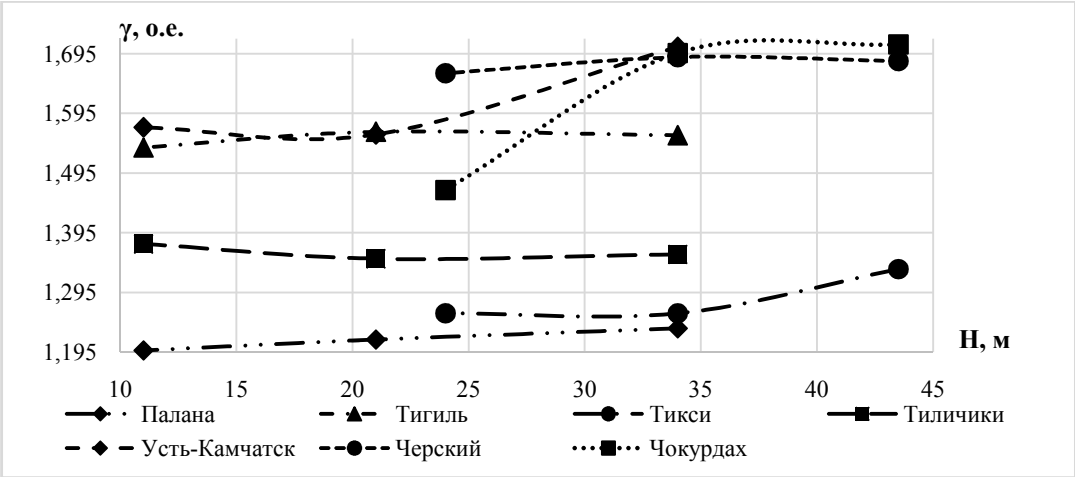

Рис. 8. Изменение параметра γ распределения Вейбулла по высоте на площадках ВИК ДФО

Fig. 8. The Weibull distribution parameter γ changing at different heights of wind measuring complexes at the Far East Federal District

Кроме того, оценивались относительные отклонения между фактическими и теоретическими повторяемостями $t(V)$ для каждой градации, в особенности для попадающих в зону рабочих скоростей ВЭУ. В качестве примера на рисунке 9 приведено изменение по высоте среднеквадратичного отклонения теоретических распределений Вейбулла (при $\gamma = \mathrm{const}$ и $\gamma = \mathrm{var}$) от фактической на площадке ВИК Усть-Камчатск.

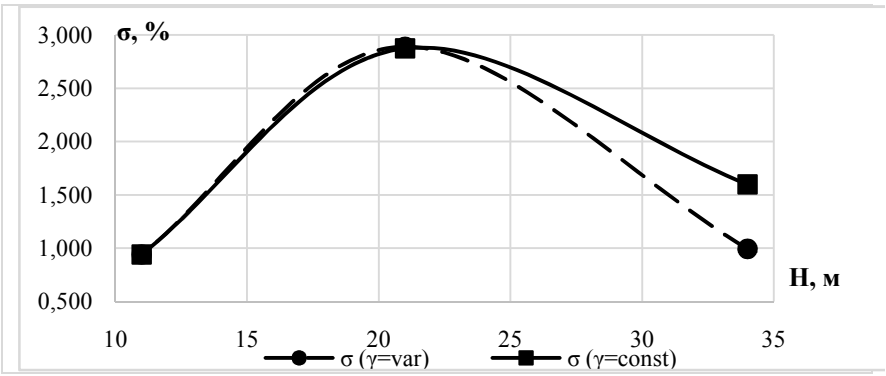

Рис. 9. Изменение по высоте среднеквадратичного отклонения теоретических распределений Вейбулла (при $\gamma = \mathrm{const}$ и $\gamma = \mathrm{var}$) от фактических на площадке ВИК Усть-Камчатск

Fig. 9. Change of the theoretical Weibull distribution standard deviation (with $\gamma = \mathrm{const}$ and $\gamma = \mathrm{var}$) from the actual ones on site Ust-Kamchatsk wind measureming complex at the different heights

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Было выявлено, что с ростом высоты при моделировании теоретическим распределением Вейбулла при $\gamma = \mathrm{var}$ среднеквадратические отклонения фактических повторяемостей от теоретических либо снижаются, либо меняются несущественно. Таким образом, было принято решение проанализировать возможность применения моделирования повторяемости скорости ветра по высоте распределением Вейбулла при принятии допущения, что параметр γ по высоте не меняется ($\gamma = \mathrm{const}$) и определяется по фактическим данным на высоте 10 м. Было выявлено, что по сравнению с предыдущим случаем ($\gamma = \mathrm{var}$) происходит относительное изменение среднеквадратического отклонения на площадках 7 ВИК в пределах ±9 %.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что на территории ДФО для пересчета повторяемости скорости ветра на высоту оси ветроколеса ВЭУ следует применять теоретическое распределение Вейбулла, причем при отсутствии данных измерений ВИК параметр γ распределения Вейбулла на разной высоте допускается принимать равным значению, определенному по фактическим данным на площадках наземных метеостанций (МС) на высоте 10 м.

Влияние коэффициента Хеллмана на энергетические характеристики ветра и энергетическую эффективность ВЭУ

В рамках разработки долгосрочной целевой программы «Развитие малой энергетики Сахалинской области на период до 2020 года» на площадке АМС Поронайск (Сахалинская область) проведено исследование влияния точности определения среднемноголетнего коэффициента Хеллмана на среднемноголетнюю скорость ветра и удельную мощность ветрового потока. Для фактического среднемноголетнего значения коэффициента Хеллмана $m = 0{,}17$ и трёх ближайших значений: а) $m = 0{,}1$; б) $m = 0{,}2$; в) $m = 0{,}3$ – были рассчитаны энергетические характеристики ветра на высотах: 15, 25, 35, 40 метров и проведено их сравнение в виде относительной погрешности. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние учёта внутригодового изменения коэффициента Хеллмана на расчёт удельных энергетических параметров вертикального профиля ветра

Table 2

Influence of subannual Hellman factor changing on the specific energy parameters calculation of the wind speed profile

m	$V_о$, м/с				$N_{уд}$, Вт/м^2				$\delta V_о$, %				$\delta N_{уд}$, %			
	h, м				h, м				h, м				h, м			
	15	25	35	40	15	25	35	40	15	25	35	40	15	25	35	40
0,17	4,1	4,5	4,8	4,9	81,8	106	126	135	-	-	-	-	-	-	-	-
0,1	4,0	4,2	4,4	4,4	75,1	88	96,8	101	–2,9	–6,6	–9,2	-10,2	–8,9	–21	–30	–34
0,2	4,2	4,6	4,9	5,1	84,8	115	141	153	1,2	2,7	3,7	4,1	3,6	7,9	11	12
0,3	4,3	5,1	5,6	5,8	95,8	152	205	232	5,1	11,2	15	17	15	30	39	42

Завышение (занижение) значения коэффициента Хеллмана относительно фактического приводит к увеличению погрешности определения удельной мощности ветрового потока и среднемноголетней скорости ветра, которое также пропорционально увеличивается с ростом высоты от поверхности земли: например, при $m = 0{,}2$ на высоте 40 метров погрешность составляет 12 %, а при $m = 0{,}3$ на той же высоте – уже 42 %.

Исследование влияния учёта внутригодового изменения коэффициента Хеллмана на среднемноголетние месячные и годовые выработки ВЭУ проводилось на площадке АМС Поронайск для фактического значения $m = 0{,}17$ и среднестатистического $m = 0{,}2$ для следующих марок ВЭУ: ЛЭМЗ-30 (30 кВт и $h_б = 15$ м), Жаворонок (30 кВт и $h_б = 26$ м), WindPower (50 кВт и $h_б = 36$ м), Northwind (100 кВт и $h_б = 37$м), Norwin (200 кВт и $h_б = 40$ м).

Было выявлено, что внутригодовое изменение коэффициента Хеллмана не влияет в целом на годовое значение выработки, но существенно влияет на месячные выработки – это особенно важно учитывать при расчёте режимов работы ВЭУ в локальных энергосистемах. Например, неучет внутригодового изменения коэффициента Хеллмана в точке АМС Поронайск на высоте 40 м приводит к завышению месячной выработки в декабре до 39,7 % и занижению до 34 % в июле. Относительное отклонение месячной выработки $\delta Э$ при учёте внутригодового распределения коэффициента Хеллмана прямо пропорционально отклонению среднемесячного показателя m_l от среднемноголетнего δm, и с ростом высоты оно увеличивается (рис. 10 и рис. 11).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

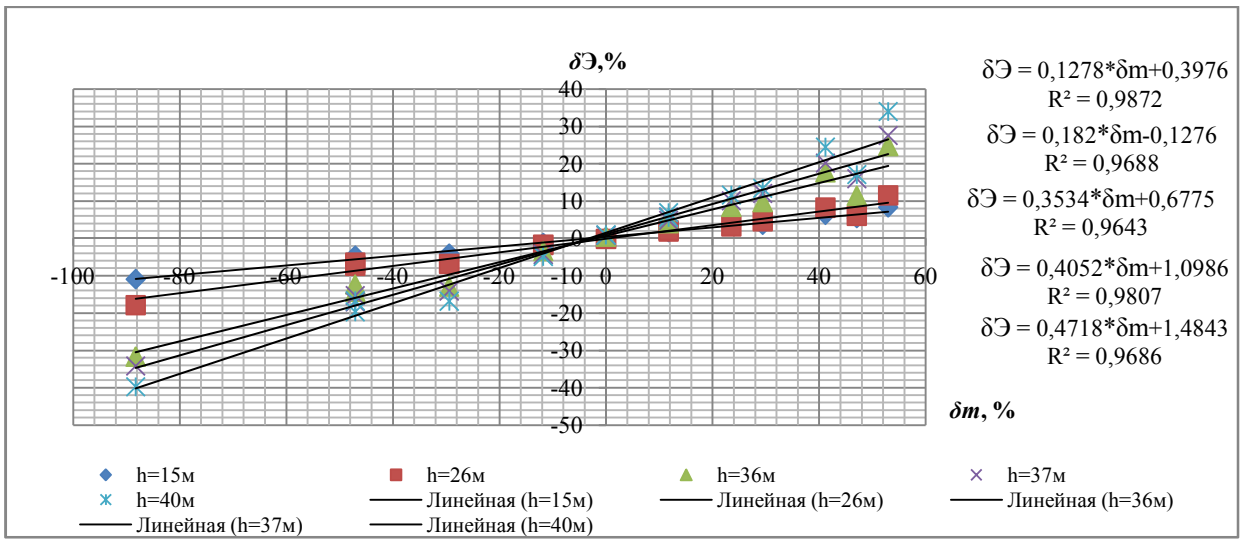

Рис. 10. Зависимость относительной погрешности определения выработки ВЭУ δЭ на различных высотах (15, 26, 36, 37, 40 метров) от ошибки при выборе коэффициента Хеллмана δ*m* (*m* = 0,17; *m* = var)
Fig. 10. Dependence of fractional error in calculating the output of the wind turbine at different heights (15, 26, 36, 37, 40 meters) on the error at choosing Hellman's coefficient factor (*m* = 0,17; *m* = var)

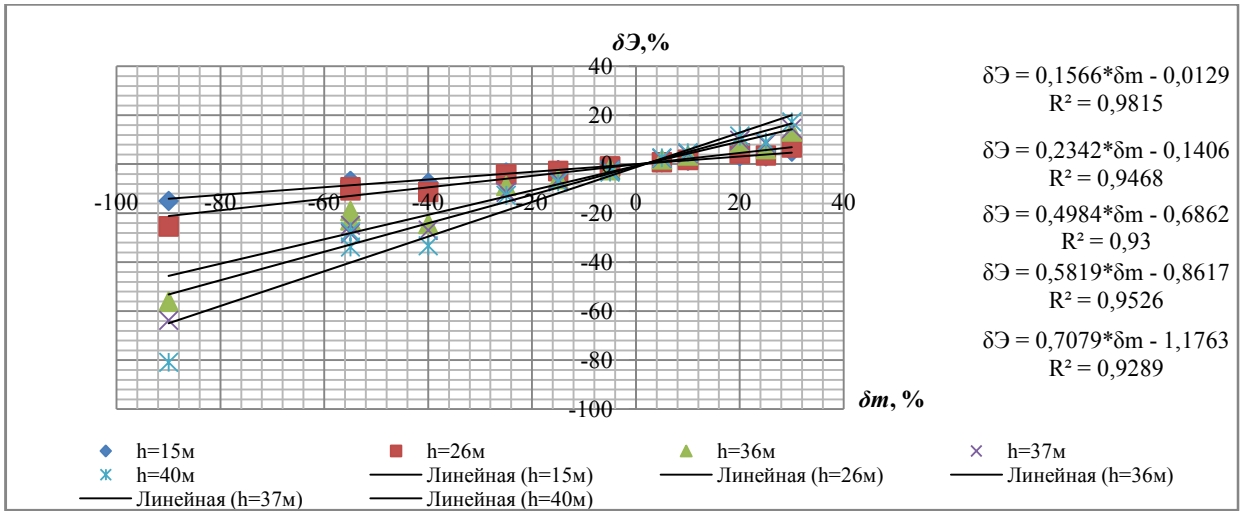

Рис. 11. Зависимость относительной погрешности определения выработки ВЭУ δЭ на различных высотах (15, 26, 36, 37, 40 метров) от ошибки при выборе коэффициента Хеллмана δ*m* (*m* = 0,2; *m* = var)
Fig. 11. Dependence of fractional error in calculating the output of the wind turbine at different heights (15, 26, 36, 37, 40 meters) on the error at choosing Hellman's coefficient factor (*m* = 0,2; *m* = var)

Также были проведены расчеты по оценке влияния точности определения среднемноголетнего коэффициента Хеллмана на среднемноголетнюю выработку ВЭУ на площадке АМС Поронайск. Сравнение производилось для трех значений годовой выработки, рассчитанных при среднемноголетних значениях *m*: а) *m* = 0,1; б) *m* = 0,2; в) *m* = 0,3 – по отношению к фактической, определенной при среднемноголетнем значении коэффициента *m* = 0,17 для предварительно выбранных ВЭУ: ЛЭМЗ-30 (30 кВт и $h_б$=15 м), Жаворонок (30 кВт и $h_б$ = 26 м), WindPower (50 кВт и $h_б$ = 36 м), Northwind (100 кВт и $h_б$ = 37м), Norwin (200 кВт и $h_б$ = 40 м).

Занижение (завышение) среднемноголетнего значения коэффициента *m* приводит к соответствующему занижению (завышению) среднемноголетней выработки, причем оно прямо пропорционально отклонению от фактической среднемноголетней выработки и увеличивается с ростом высоты.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Влияние коэффициента Хеллмана на энергетическую эффективность ВЭС, входящей в локальную энергетическую систему

Практическая ценность предложенной в работе методики учёта местных особенностей вертикального профиля ветра показана на примере расчёта ветродизельного энергетического комплекса (ВДЭК) для локальной энергетической системы села Новиково Корсаковского района Сахалинской области.

На сегодняшний день потребители села Новиково обеспечиваются электроэнергией за счёт дизельной электростанции (ДЭС). В состав ДЭС входит дизельный генератор CATERPILLAR C-18 ATAAC мощностью 635 кВт. Состав потребителей села Новиково следующий: 77 % – население, 16 % – промышленность, 8 % – ЖКХ. Для обеспечения работы Новиковской ДЭС ежегодно тратится 173,7 тонн дизельного топлива, что при стоимости в 22 тыс руб/тонна составляет 3 822 тыс руб в год. Для снижения затрат на дизельное топливо была рассмотрена целесообразность внедрения ВЭС в существующую локальную энергосистему на базе ДЭУ с системой аккумуляции энергии и без этой системы. Пересчет скорости ветра по высоте проводился с учетом и без учета внутригодового изменения коэффициента Хеллмана.

По разработанному авторами алгоритму [4] были проведены предварительные расчёты параметров локальной энергетической системы, выбран оптимальный состав оборудования ВЭС и оценены параметры энергосбережения и энергоэффективности данного решения. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Применение ветродизельного энергетического комплекса, даже без системы аккумуляции энергии для энергоснабжения потребителей локальных энергетических систем, позволяет повысить энергоэффективность системы и приводит к энергосбережению, давая возможность снизить расход дорогостоящего дизельного топлива на 20–25 %.

2) Предложенная авторами методика, основанная на фактических данных многолетних наблюдений на АМС, повышает точность определения годовых энергетических показателей ВЭУ. В примере показано, что отклонение среднемноголетнего коэффициента Хеллмана (m = 0,2) на 0,03 от фактического (m = 0,17) приводит к завышению выработки ВЭУ до 7–10 % по сравнению с фактическими данными.

3) Учёт внутригодового изменения коэффициента Хеллмана приводит к повышению точности определения среднемноголетних месячных выработок ВЭС и ДЭС, входящих в состав локальной энергетической системы.

На примере ВДЭК с. Новиково при оценке энергетических показателей ветродизельного энергетического комплекса при внедрении ВЭУ с высотой башни, превышающей 30 м, необходимо учитывать внутригодовое изменение коэффициента Хеллмана. Для ВЭУ с высотой башни до 25–30 м это явление принимать во внимание нецелесообразно из-за усложнения расчётов, так как изменение месячной выработки ВЭУ при этом не превышает 5–7 %, что лежит в пределах погрешности определения скорости ветра.

Выводы

Существующие методики расчёта коэффициента Хеллмана вертикального профиля ветра для условий Российской Федерации неприменимы из-за разнообразия местного рельефа, что приводит к возникновению существенной погрешности (до 300 %) в определяемых характеристиках ветра.

В статье показано влияние точности определения коэффициента Хеллмана на энергетические характеристики ветра и энергетическую эффективность как одиночной ВЭУ, так и ВЭС, входящей в состав локальной энергосистемы.

Авторами предложен подход к моделированию вертикального профиля ветра, базирующийся на использовании эмпирических данных, полученных на аэрологических станциях. Для возможности практической реализации учёта эмпирических характеристик вертикального профиля ветра при проектировании ВЭС разработана специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра». Предложенный подход верифицирован по фактическим данным ветроизмерительных комплексов, расположенных на территории Дальневосточного федерального округа, что говорит о применимости предлагаемого подхода.

Список литературы

1. WWEA Publishes half-year report 2014. [Электронный ресурс]: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf.

2. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2012.

3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620870. Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра» / Вась-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», №2012620664 // заявл. 28.06.2012; опубл. 28.08.2012.

4. Васьков А.Г. Разработка методики обоснования состава и параметров гибридных энергокомплексов для распределённых энергосистем: автореф. дис. ... на соискание степени канд. техн. наук. Москва, 2013.

5. Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Чернов Д.А. Уточнение методики оценки параметров проектируемых ветроэлектрических станций // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2013. № 16. С. 22–28.

References

1. WWEA Publishes half-year report 2014. Available at: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf.

2 Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V., Shestopalova T.A. Osnovnye harakteristiki vetra. Resursy vetra i metody ih rasčeta: textbook. Moscow: Izdatel'stvo MÈI Publ., 2012.

3. Vaskov A.G., Deryugina G.V., Tyagunov M.G., Chernov D.A. Specializirovannaâ baza dannyh «Vertikal'nyj profil' vetra». Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh, no. 2012620870; applicant is National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (no. 2012620664); 28.08.2012.

4. Vaskov A.G. Razrabotka metodiki obosnovaniâ sostava i parametrov gibridnyh ènergokompleksov dlâ raspredelënnyh ènergosistem: PhD thesis (engineering). Moscow, 2013.

5. Vaskov A.G., Deryugina G.V., Chernov D.A. Utočnenie metodiki ocenki parametrov proektiruemyh vetroèlektričeskih stancij. *International Scientific Journal "Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ" (ISJAEE)*, 2013, no. 16, pp. 22–28.

Транслитерация по ISO 9:1995

Преподаватели кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ МЭИ

Малинин Николай Константинович

Родился 25.11.1938 в Москве. Окончил Московский Энергетический институт (МЭИ) в 1962 г по специальности «Гидроэнергетические установки» на кафедре «Гидроэнергетики» старшим инженером. Кандидат технических наук (1968), доктор технических наук (1993), доцент (1972), профессор (1995). Член-корр. РАЭН.

Направление научной деятельности: теория и методы обоснования параметров и режимов энергетических установок, гидроэлектростанций и энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии с учетом социально-экологических факторов.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"