



УДК

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНОВ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

А. Б. Рыхлов

Саратовский государственный университет,
кафедра метеорологии и климатологии
E-mail: kafmeteo@sgu.ru

Установлена связь и получены математические выражения, позволяющие оценить параметры степенной и логарифмической функций высоты по значению средней скорости ветра на уровне 10 м на юго-востоке европейской части России.

Ключевые слова: параметр шероховатости, точность, закон, ветер, средняя месячная скорость, изменение с высотой, аппроксимация.

Estimation of Parameters of Laws of Change of Average Speed of the Wind with height in the Ground Layer of Atmosphere on South-East European Part of Russia for the Decision of Problems About Wind Power

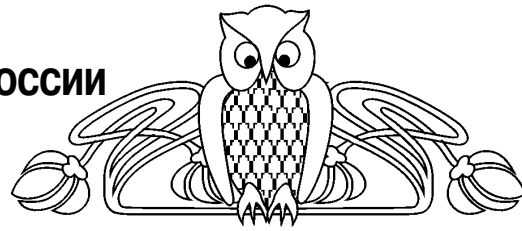
A. B. Rykhlov

Connection is established and the mathematical expressions are received, allowing to estimate parameters of sedate and logarithmic functions of height on value of average speed of a wind at level of 10 m on SOUTH-EAST EUROPEAN PART OF RUSSIA.

Key words: roughness parameter, accuracy, the law, a wind, average monthly speed, change with height, approximation.

Для решения ряда научных и прикладных задач в климатологии необходимо определение средней скорости ветра на заданной высоте приземного слоя атмосферы. Одной из таких задач является оценка ветроэнергетического потенциала на оси ветроколеса ветроэнергетической установки (ВЭУ). Здесь уместно отметить, что по мере решения технических проблем создания новых ВЭУ возник интерес к ресурсам энергии ветра до высот несколько сотен метров. Так, в Германии вблизи городка Морбах с населением 11 тыс. человек завершается создание крупнейшей в мире ВЭУ типа FL-2005, диаметр ветроколеса которой около 100 м, а ось располагается на высоте 160 м [1].

Оценка средних скоростей ветра на произвольных высотах в местах возможного размещения ВЭУ, где метеорологических наблюдений как правило не имеется, задача нетривиальная. В одном из вариантов ее решения предусматривается интерполяция на базе данных справочников по климату средних скоростей ветра на уровне ветроизмерительного прибора в требуемый



пункт. В последующем производится уточнение их значений на требуемой высоте. Для этого, как было показано нами [2], с одинаковым успехом может быть использована либо степенная, либо логарифмическая формула

$$\frac{\bar{v}_z}{\bar{v}_h} = \left(\frac{z}{h}\right)^m \quad \text{и} \quad (1)$$

$$\bar{v}_z = \bar{v}_h \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln h - \ln z_0}, \quad (2)$$

где \bar{v}_z и \bar{v}_h – средние скорости ветра на произвольной высоте z и флюгера h , м; z_0 – параметр шероховатости; m – безразмерный параметр. Эти параметры в общем случае зависят от турбулентности, стратификации атмосферы и местных физико-географических условий.

В последние десятилетия общего мнения в отношении параметров m и z_0 не сложилось. Трудность состоит в том, что значения этих параметров заранее неизвестны и им присуща большая изменчивость по территории. Погрешности определения их значений приводят к искажению средних скоростей ветра на высотах, а следовательно, и действительного ветроэнергетического потенциала.

Вместе с тем многими учеными отмечалась зависимость рассматриваемых параметров z_0 и m от средней скорости ветра вблизи земной поверхности (на уровне флюгера) [1, 3, 4]. Учитывая это, нами решалась задача изучения характера данной связи с целью установления научной основы определения параметров z_0 и m по средней скорости ветра на уровне флюгера. Это тем более важно, поскольку позволяет получить математические модели изменения скорости ветра с высотой и обеспечить получение надежных величин ветроэнергетического потенциала на требуемой высоте.

Для решения этой задачи нами произведен массовый расчет параметров z_0 и m в отдельных пунктах рассматриваемой территории по вертикальному профилю ветра. В качестве исходных данных были использованы материалы «Нового аэроклиматического справочника пограничного слоя атмосферы над СССР» [5], где приведены статистические параметры ветра на различных уровнях за период 1970–1980 гг.



Далее, используя рассчитанные нами значения z_0 и m , нами осуществлен выбор вида связи и произведена оценка тесноты связи между ними и средней скоростью ветра на высоте флюгера v_0 . Сопоставление значений, рассчитанных z_0 со средней скоростью ветра на уровне флюгера позволило установить, что между ними действительно имеется достаточно тесная связь, коэффициент надежности аппроксимации составляет около 0,94 (рис. 1, 2). Такая тесная связь позволяет произвести надежную оценку параметров функций высоты по средним месячным и годовым скоростям ветра на сети метеорологических станций в регионе.

Как видно на рис. 1, 2, связь между параметрами z_0 , m и v_0 явно нелинейная. Учитывая, что характер связи между ними заранее неизвестен, для ее математического представления нами были испытаны наиболее часто употребляемые элементарные функции: степенная, экспоненциальная, линейная, логарифмическая и полиномиальная.

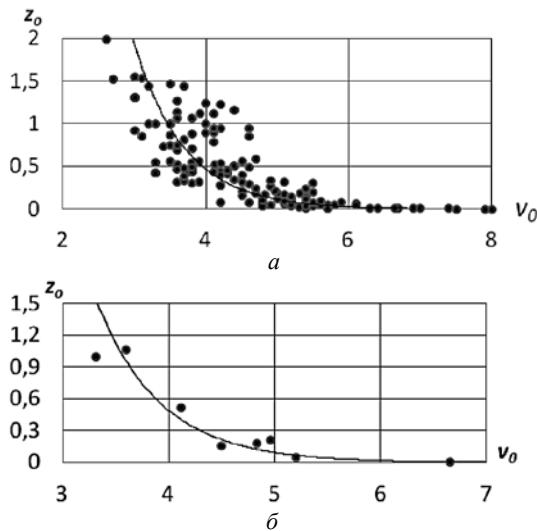


Рис. 1. Связь параметра шероховатости z_0 , m , со средней скоростью ветра на уровне (флюгера) v_0 : a – средние месячные значения; b – средние годовые значения

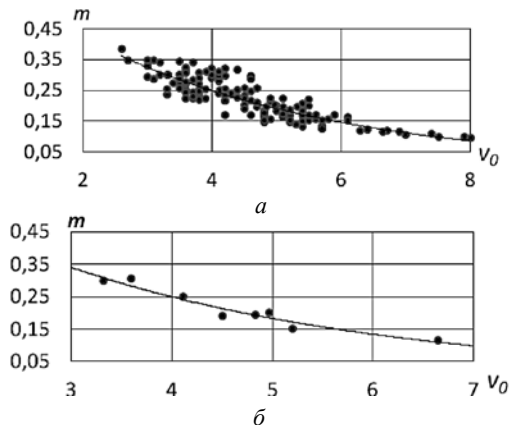


Рис. 2. Связь параметра m со средней скоростью ветра на уровне (флюгера) v_0 : a – средние месячные значения; b – средние годовые значения

В результате испытаний в настоящей работе показано, что по величине достоверности аппроксимации R^2 наиболее приемлемыми оказываются экспоненциальная и степенная функции (табл. 1). Исследователи ветроэнергетического потенциала Кольского полуострова без обоснования отдали предпочтение степенной функции [6]. Величина достоверности аппроксимации R^2 показывает, что наиболее предпочтительной оказывается все же экспонента, особенно для средних годовых значений скорости ветра.

Таблица 1

Коэффициент надежности аппроксимации R^2 для различных функций

Функция	Средние годовые значения		Средние месячные значения	
	m	z_0	m	z_0
Степенная	0,94	0,93	0,87	0,84
Экспонента	0,95	0,95	0,87	0,88
Линейная	0,90	0,62	0,80	0,61
Логарифмическая	0,93	0,72	0,85	0,70
Параболическая	0,94	0,94	0,86	0,80

Уравнения связи между параметрами z_0 , m и v для экспоненты, рассчитанными нами методом наименьших квадратов, имеют следующий вид: по средним годовым значениям:

$$z_0 = 381,6 \cdot e^{-1,66v_0}, \quad (3)$$

$$m = 0,864 \cdot e^{-0,31v_0}, \quad (4)$$

по всей совокупности средних месячных значений:

$$z_0 = 118,2 \cdot e^{-1,41v_0}, \quad (5)$$

$$m = 0,744 \cdot e^{-0,27v_0}, \quad (6)$$

где v_0 – средняя месячная скорость ветра на высоте флюгера.

Используя уравнения (3) и (4) нами получены расчетные средние годовые значения параметров z_0 и m для рассматриваемых станций и выполнено сравнение их со значениями, полученными из непосредственных наблюдений. Оказалось, что в подавляющем числе случаев относительные погрешности не превышают 3% относительно наблюдаемой величины и лишь на отдельных станциях они повышаются до 5–6%. Из этого следует, что полученные формулы можно достаточно надежно использовать для расчета параметров как логарифмической, так и степенной функций изменения средней скорости ветра с высотой на юго-востоке европейской части России.

Аналогичные расчеты произведены и для средних месячных значений параметров z_0 и m функций высоты по формулам (5) и (6). Результаты их анализа показали, что и в этом случае относительные погрешности наиболее часто не превышают 6%. Однако иногда, преимущественно в теплый период года, они по отношению к на-



блюденным повышаются до 15–25%, особенно для параметра z_0 .

Кроме того, нами рассчитаны месячные значения параметров z_0 и m по формулам для годовых значений (формулы (3) и (4)). Результаты анализа позволили установить, что расхождения средних месячных значений параметра m по формулам (4) и (6) составляют не более 0,01, что соответствует точности округления. Из этого следует, что формула (4) имеет универсальное значение: она может с успехом использоваться для расчета как месячных значений параметра m , так и годовых. Ввиду большего диапазона изменчивости различия между соответственно месячными значениями z_0 , рассчитанными по формулам (3) и (5), несколько возрастают. Это еще раз свидетельствует о предпочтительности использования степенной функции изменения средней скорости ветра с высотой.

В результате нами установлено, что в большинстве случаев использование формул (3)–(6) для расчета значений z_0 и m приемлемо и для оценки месячных параметров функции высоты. В рассма-

триваемом диапазоне средних месячных скоростей ветра эти формулы дают практически одинаковые оценки. Вместе с тем для скоростей ветра менее 3,5 м/с расхождения увеличиваются. Учитывая, что на рассматриваемой территории снижение скоростного ветрового режима происходит преимущественно в летний период, то и увеличенные погрешности характерны для этого времени года.

В качестве следующего этапа исследования, нами решена задача по исследованию погрешностей восстановления средних месячных и годовых скоростей ветра на высоте 100 м с использованием расчетных параметров изменения с высотой, оцененных с использованием формул (3–6). Результаты расчетов представлены в табл. 2. Как оказалось, в большинстве случаев применение полученных формул позволяет получить значения средних скоростей ветра на высоте 100 м близкие к наблюдаемым. При анализе табл. 2 необходимо иметь в виду, что статистические ошибки наблюдаемых скоростей ветра составляют 0,4–0,6 м/с, или 5–10% соответствующих значений, поэтому ошибки менее 10% следует считать приемлемыми.

Таблица 2

Относительные погрешности, %, расчета средних скоростей ветра на уровне 100 м

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Волгоград	z_0	0	0	-1	0	-3	-6	-7	-6	-3	0	-2	1	0
		-1	-1	-3	-1	-4	-7	-8	-7	-4	-2	-3	-1	-1
	m	3	3	1	1	-3	-10	-10	-8	-5	0	-1	3	2
		2	1	-1	-1	-5	-10	-11	-9	-7	-2	-3	1	-2
Казань	z_0	0	0	-2	-2	-9	-17	-18	-15	-5	-5	-7	-1	-3
		0	0	-2	-1	-8	-15	-12	-9	-3	-5	-6	-1	-2
	m	-4	-3	-6	-5	-12	-19	-15	-10	-7	-9	-10	-4	-5
		-4	-3	-6	-5	-12	-18	-12	-8	-6	-9	-10	-4	-6
Куйбышев	z_0	7	0	9	5	-3	-38	-47	-36	-14	10	3	13	2
		10	6	12	9	2	-19	-23	-14	-1	14	8	14	6
	m	7	5	8	7	-1	-12	-13	-4	3	12	7	11	5
		8	7	9	9	1	-8	-9	0	6	14	9	12	6
Оренбург	z_0	2	9	6	2	5	-10	-13	-16	-7	-4	-1	12	3
		3	10	8	3	6	-6	-7	-11	-3	0	2	14	4
	m	-1	7	4	-1	2	-9	-9	-13	-5	-3	-1	11	2
		0	7	4	-1	2	-7	-7	-11	-4	-2	0	12	1
Пенза	z_0	2	6	2	0	-2	-10	-15	-17	1	10	4	2	3
		2	5	1	0	-2	-6	-9	-11	3	9	4	1	3
	m	-1	3	0	-3	-6	-9	-10	-12	-1	7	1	-1	1
		-1	2	-1	-4	-6	-7	-8	-9	-1	7	1	-2	-1
Саратов	z_0	1	-3	-6	-3	-6	-8	-12	-10	-4	-1	-3	-1	3
		0	-3	-7	-4	-6	-7	-11	-10	-3	-1	-4	-2	3
	m	-1	-7	-8	-6	-9	-11	-15	-14	-7	-4	-6	-4	-5
		-3	-7	-9	-7	-9	-11	-15	-14	-7	-4	-7	-5	-6



Окончание табл. 2

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Уральск	z_0	2	2	0	4	4	2	3	3	6	9	4	4	4
		2	2	0	3	3	3	5	5	8	10	4	4	2
	m	0	0	-2	2	1	-1	1	1	4	6	1	2	6
		-1	-1	-3	1	0	0	2	1	4	6	1	1	6
Уфа	z_0	-14	-9	-6	-18	-3	-12	-57	-65	-19	-1	-6	-6	-12
		-9	-6	-4	-11	0	-6	-32	-32	-9	2	-2	-2	5
	m	-8	-6	-7	-6	0	-4	-8	-1	0	0	-3	-4	-2
		-5	-3	-5	-3	3	-1	-2	4	4	2	0	-1	-1

Примечание. Для z_0 и m строка 1 – по формуле для средних годовых значений; строка 2 – для средних месячных значений

Однако анализ табл. 2 обращает внимание на то обстоятельство, что в летние месяцы, преимущественно в период июнь–август, расхождения между наблюдаемыми и расчетными средними скоростями ветра существенно выходят за пределы случайных ошибок. Это обуславливает необходимость учета сезонных особенностей формирования средних месячных скоростей ветра. Этого можно достичь путем временного дифференцирования интерполяционных формул. Для наглядного представления сезонного вида связи нами построены графики связи между средней скоростью ветра на высоте 10 м и параметрами z_0 и m для лета (июнь–август) и для остальных месяцев года. Для параметра шероховатости такая связь представлена на рис. 3.

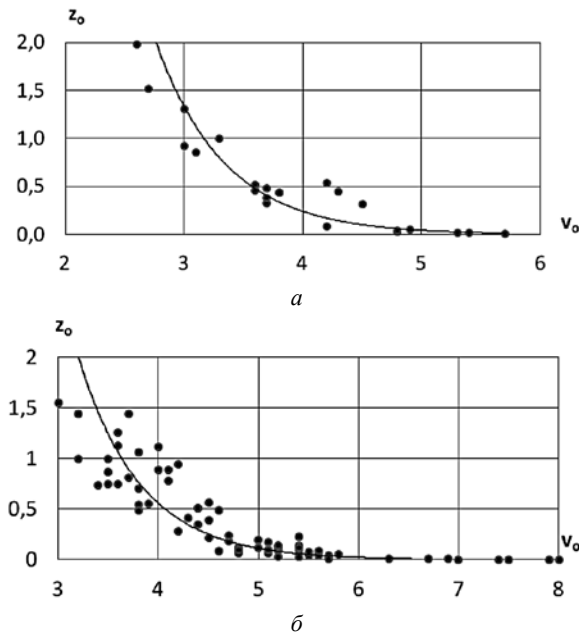


Рис. 3. Связь параметра z_0 со средней месячной скоростью ветра на высоте флюгера v_0 летом (а) и остальные месяцы года (б)

Уточненные нами для сезонов параметры вертикального изменения средних скоростей ветра с учетом временной обособленности следует оценивать по формулам:
без лета

$$z_0 = 335,9 \cdot e^{-1,60v}, \quad (7)$$

$$m = 0,798 \cdot e^{-0,28v}, \quad (8)$$

лето

$$z_0 = 228,6 \cdot e^{-1,71v}, \quad (9)$$

$$m = 0,911 \cdot e^{-0,35v}. \quad (10)$$

Интерполяционные уравнения рассчитаны методом наименьших квадратов. Достоверность аппроксимации связи рассматриваемых величин экспонентой для средних месячных скоростей ветра возросла до 0,92–0,95, а это свидетельствует о достаточно надежной связи рассматриваемых величин.

При проведении тех или иных расчетов всегда следует оценивать точность полученных характеристик для решения поставленных задач. Нами получены абсолютные и относительные погрешности параметров z_0 и m по интерполяционным формулам путем сравнения их с наблюдаемыми (табл. 3, 4).

В отношении z_0 , обладающим большим диапазоном изменчивости, как абсолютные, так и относительные погрешности на отдельных станциях оказываются значительными по величине (см. табл. 3). Гораздо меньшими оказываются погрешности расчета параметра m по полученным формулам (см. табл. 4). В этом случае абсолютные погрешности не превышают 0,04, а ввиду малости наблюдаемой величины относительные погрешности в отдельных случаях возрастают до 15%. При этом следует иметь в виду, что абсолютная погрешность в 0,01, возможная, например, за счет округления, может составлять 10%. Следовательно, полученную точность расчета параметра m следует считать приемлемой.



Таблица 3

Погрешности расчета параметра шероховатости z_0 по интерполяционным формулам (3)–(4) и (7)–(10)

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Волгоград	z_0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
	Δ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01
	%	0	0	0	0	0	-50	-100	0	-100	0	0	0	0
Казань	z_0	0,18	0,12	0,12	0,22	0,08	0,08	0,33	0,52	0,28	0,08	0,07	0,09	0,15
	Δ	0,00	0,01	-0,03	-0,03	-0,13	-0,09	-0,08	0,04	-0,12	-0,07	-0,08	0,00	-0,07
	%	0	8	-25	-14	-163	-113	-24	8	-43	-88	-114	0	-47
Куйбышев	z_0	0,89	1,13	0,89	1,06	0,71	0,85	0,92	1,31	1,44	1,44	1,26	0,95	1,06
	Δ	0,34	0,07	0,42	0,29	-0,06	-0,29	-0,43	-0,04	-0,57	0,54	0,20	0,55	0,08
	%	38	6	47	27	-8	-34	-47	-3	-40	38	16	58	8
Оренбург	z_0	0,41	0,56	0,51	0,24	0,39	0,44	0,48	0,38	0,54	0,55	0,56	1,00	0,49
	Δ	0,07	0,31	0,22	0,06	0,14	0,20	0,07	-0,03	-0,23	-0,10	0,45	0,31	0,11
	%	17	55	43	25	36	45	15	-8	-43	-18	45	40	21
Пенза	z_0	0,08	0,14	0,05	0,08	0,12	0,44	0,52	0,46	0,34	0,23	0,19	0,06	0,17
	Δ	0,02	0,08	0,02	0,00	-0,03	0,10	0,04	-0,02	0,05	0,17	0,08	0,02	0,04
	%	17	55	43	25	36	45	15	-8	-43	-18	45	40	21
Саратов	z_0	0,04	0,06	0,01	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,10	0,09	0,04	0,04	0,04
	Δ	0,00	-0,03	-0,03	-0,02	-0,05	0,00	-0,03	-0,02	-0,05	0,00	-0,02	-0,01	-0,03
	%	0	-50	-300	-50	-167	0	-100	-50	-50	0	-50	-25	-75
Уральск	z_0	0,08	0,12	0,05	0,08	0,14	0,32	0,53	0,45	0,51	0,48	0,17	0,12	0,20
	Δ	0,03	0,04	0,01	0,04	0,06	0,22	0,36	0,30	0,22	0,27	0,08	0,06	0,10
	%	38	33	20	50	43	69	68	67	43	56	47	50	50
Уфа	z_0	0,74	0,74	0,49	1,00	1,00	1,00	1,52	1,98	1,55	0,82	0,87	0,75	0,99
	Δ	-0,72	-0,50	-0,28	-1,01	-0,24	0,19	-0,74	-0,70	-1,23	-0,08	-0,37	-0,31	-0,56
	%	-97	-68	-57	-101	-24	19	-49	-35	-79	-10	-43	-22	-78

Таблица 4

Погрешности расчета параметра m по интерполяционным формулам

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Волгоград	m	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14	0,12	0,10	0,11	0,11
	Δ	0,02	0,01	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,01	0,00	-0,02	0,00	-0,01	0,01	0,00
	%	20	10	0	0	-17	0	-8	0	-14	0	-10	9	0
Казань	m	0,20	0,18	0,18	0,20	0,17	0,17	0,22	0,25	0,22	0,17	0,16	0,17	0,19
	Δ	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,01	-0,03	-0,04	-0,05	-0,02	-0,02
	%	-5	-11	-17	-15	-29	-24	-14	-4	-14	-24	-31	-12	-11
Куйбышев	m	0,29	0,31	0,29	0,31	0,27	0,29	0,29	0,33	0,34	0,34	0,32	0,30	0,31
	Δ	0,03	0,02	0,04	0,03	-0,01	-0,02	-0,03	0,01	0,01	0,06	0,03	0,05	0,03
	%	10	6	14	10	-4	-7	-10	3	3	18	9	17	10
Оренбург	m	0,24	0,26	0,25	0,21	0,23	0,24	0,24	0,23	0,25	0,25	0,26	0,30	0,25
	Δ	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	0,04	0,03	0,01
	%	0	12	8	0	0	0	-4	-9	-12	-8	13	11	4
Пенза	m	0,17	0,19	0,16	0,17	0,18	0,24	0,25	0,24	0,23	0,21	0,20	0,16	0,20
	Δ	-0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,03	0,00	-0,01	-0,02	0,00	0,03	0,00	-0,01	0,01
	%	-6	5	0	-12	-17	0	-4	-8	0	14	0	-6	5
Саратов	m	0,15	0,16	0,12	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,18	0,17	0,15	0,15	0,15
	Δ	-0,01	-0,03	-0,04	-0,03	-0,04	-0,01	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,02
	%	-7	-19	-33	-20	-27	-7	-21	-13	-17	-12	-20	-13	-13



Окончание табл. 4

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Уральск	m	0,17	0,18	0,15	0,17	0,19	0,22	0,25	0,24	0,25	0,25	0,20	0,18	0,20
	Δ	0,00	-0,01	-0,02	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01
	%	0	-6	-13	0	0	14	16	17	8	12	5	0	5
Уфа	m	0,27	0,28	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,38	0,35	0,28	0,29	0,28	0,30
	Δ	-0,04	-0,02	-0,03	-0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
	%	-15	-7	-12	-10	0	3	0	3	3	0	-3	-4	-3

Однако практическую ценность погрешностей параметров z_0 и m можно оценить лишь по точности восстановления средних скоростей ветра на той или иной высоте. Собственно для этого они и предназначены. Нами по средней скорости ветра на высоте флюгера (10 м) и параметрам z_0 и m , полученным по интерполяционным формулам, рассчитаны

средние месячные скорости ветра на уровне 100 м. Результаты расчетов представлены в табл. 5. Как показывает их анализ, все же к лучшим результатам восстановления средних скоростей ветра на высоте 100 м приводит использование параметра m , а не параметром z_0 , хотя принципиальных различий между ними не обнаруживается.

Таблица 5

Средние скорости ветра, V , м/с, на высоте 100 м, абсолютные, Δ , м/с, и относительные, %, погрешности их восстановления по интерполяционным формулам для z_0 и m

Станция	Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Волгоград	V	10,0	9,9	9,4	9,0	8,3	7,3	7,3	7,6	7,8	8,8	8,9	9,5	
	z_0	Δ	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,2	0,1
		%	0	0	-1	0	-2	-1	-2	-1	0	0	-2	1
	m	Δ	0,3	0,2	0,0	0,0	-0,3	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,2	0,2
		%	3	2	0	0	-4	-1	-2	0	-3	-1	-2	2
	Казань	V	7,4	7,6	7,3	7,2	6,8	6,2	6,2	6,4	6,9	7,1	7,0	7,6
z_0		Δ	1,0	-0,2	0,2	0,0	-0,1	-0,4	-0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,7
		%	-1	3	1	0	-2	-5	-3	1	-4	-3	-4	2
m		Δ	0,7	-0,5	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,3	0,4
		%	-5	0	-5	-2	-6	-7	-6	-2	-1	-1	-3	5
Куйбышев		V	7,8	7,4	8,0	7,7	7,1	6,0	5,9	6,4	7,0	8,1	7,6	8,3
	z_0	Δ	0,6	0,1	0,8	0,5	-0,1	-0,4	-0,6	-0,1	-0,8	0,5	0,3	0,6
		%	8	2	9	6	-1	-6	-9	-1	-10	6	4	8
	m	Δ	0,5	0,4	0,7	0,5	-0,1	-0,3	-0,4	0,1	0,2	0,6	0,6	0,4
		%	7	5	8	7	-1	-5	-6	2	3	8	7	5
	Оренбург	V	7,4	8,1	7,8	7,6	7,7	6,6	6,5	6,3	6,8	7,0	7,2	8,2
z_0		Δ	0,2	0,2	0,5	0,2	0,4	0,2	0,1	-0,1	-0,4	-0,2	0,0	0,6
		%	2	-1	7	3	5	3	2	-1	-6	-3	0	8
m		Δ	-0,1	-0,1	0,3	-0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,2	-0,1	0,5
		%	3	-1	4	-1	2	0	-1	-4	-5	-3	-1	6
Пенза		V	8,0	8,3	8,3	7,7	7,3	6,6	6,4	6,3	7,4	8,7	7,9	8,1
	z_0	Δ	0,2	0,5	0,2	0,0	-0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	-0,1	0,3	0,1
		%	2	6	2	0	-2	3	1	-1	2	-2	4	2
	m	Δ	-0,1	0,2	0,0	-0,3	-0,5	0,0	-0,1	-0,2	0,1	-0,4	0,0	-0,1
		%	-1	2	0	-4	-6	0	-2	-4	-2	-5	0	-1
	Саратов	V	8,1	7,4	7,6	7,6	7,3	7,0	6,7	6,8	7,2	7,6	7,6	7,8
z_0		Δ	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,4	0,0	-0,3	-0,2	-0,2	0,0	-0,5	-0,4
		%	-1	-2	3	-3	-5	-1	-4	-3	-3	0	-3	-1
m		Δ	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	-0,7	-0,1	-0,4	-0,3	-0,6	-0,3	-0,5	-0,4
		%	-2	-6	-6	-7	-9	-2	-6	-4	-8	-4	-7	-5



Станция	Параметр		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Уральск	V		8,1	7,9	8,0	8,3	8,0	7,5	7,5	7,5	7,8	8,1	8,0	8,2
	z_0	Δ	0,2	0,2	0,0	0,3	0,3	0,7	0,9	0,9	0,5	0,8	0,4	0,4
		%	-1	3	1	4	4	9	11	10	7	6	6	2
	m	Δ	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	0,0	0,6	0,7	0,6	0,3	0,5	0,1	0,1
%		-1	-1	-3	1	0	7	9	9	4	2	2	-1	
Уфа	V		6,4	6,6	6,7	6,4	7,0	6,6	6,0	6,3	6,7	7,1	6,8	6,8
	z_0	Δ	-1,1	-0,8	-0,5	-1,4	-0,4	0,3	-0,9	0,8	-1,7	-0,1	-0,6	-0,5
		%	-17	-12	-8	-22	-5	4	-15	-13	-25	-2	-8	-7
	m	Δ	-0,5	-0,4	-0,5	-0,4	0,0	0,2	-0,1	0,3	0,1	0,0	-0,2	-0,2
%		-8	-6	-7	-6	0	3	-2	4	1	0	-3	-4	

Погрешности имеют как положительный, так и отрицательный знак, это отражает колебательный характер относительно генеральной закономерности, а полученные результаты следует считать сглаженными на большей совокупности значений. В большинстве случаев погрешности при этом, особенно для годовых значений, не превышают 1–3 % и лишь в отдельных случаях повышаются до 6%, что все же соответствует величине случайных ошибок. А случайные ошибки, как известно, складываются из погрешностей измерения и расчета статистических характеристик. Все это позволяет считать, что расчетные характеристики могут лучше отражать изменение средних значений скорости ветра с высотой. Этот вывод подтверждается и тем, что наибольшие погрешности приходится на наименьшие средние месячные скорости ветра, а, как известно, наименьшие значения измеряются с наибольшими ошибками.

Средние годовые значения скоростей ветра на уровне 100 м более надежно восстанавливаются с использованием степенного закона или параметра m , рассчитанного по формуле (1). При использовании параметра z_0 как абсолютные, так и относительные их ошибки оказываются несколько выше.

Анализ восстановления средних годовых значений скоростей ветра на уровне 100 м по параметру m показал, что принципиальных различий в использовании формулы 5 (для средних годовых значений) и формулы (7) (средние месячные значения) не имеется. По параметру z_0 в отдельных случаях имеет место повышение погрешностей.

В 2004 г. правительством Саратовской области рассматривался вопрос о возможности размещения в регионе парка ВЭУ немецкой компании *Nordex*. В связи с необходимостью уточнения ветрового режима и ветровых ресурсов в области, выбора типа ВЭУ и условий их эксплуатации в марте-мае 2004 г. были проведены изыскатель-

ские 8-срочные наблюдения за скоростью ветра на высотах 14 м и 59 м с участием автора в роли ответственного исполнителя НИР [2].

Полученный массив данных параметров ветра использован для установления закона изменения скорости ветра с высотой на юго-востоке Саратовской области. Этот закон позволяет оценить среднюю скорость ветра на высоте установки оси ветроколеса ветроэнергетической установки по наземным измерениям. Оценки нарастания скорости ветра с высотой полностью соответствуют полученным в настоящей работе выводам.

Результаты работы были использованы для технико-экономического обоснования схем размещения ветроэнергетических установок (ВЭУ) на территории области, величины вырабатываемой ими электрической энергии, ее стоимостных показателей, срока окупаемости и проектирования ВЭУ.

Библиографический список

1. Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России // Тр. ГГО. 2008. Вып. 557. С. 53–66.
2. Волков С. А., Рыхлов А. Б., Тверской А. К. Ветроэнергетика: реальность и перспективы // Энергосбережение в Саратовской области. 2004. № 3. С. 38–42.
3. Борисенко М. М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Тр. ГГО. 1974. Вып. 320. 205 с.
4. Заварина М. В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. Л., 1971. 162 с.
5. Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР : в 2 т. Т. 2. Статистические характеристики ветра. Кн. 1–10. М., 1986. 184 с.
6. Минин В. А., Дмитриев Г. С., Иванова Е. А., Морозкина Т. Н., Никифорова Г. В. Ресурсы ветровой энергии Мурманской области и возможности их промышленного использования. URL: <http://www.kolasc.net.ru/russian/sever06.html> (дата обращения: 16.09.2010).