

В.С. Подгуренко, Київ

В.Є. Терехов, Київ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЕТРОИЗМЕРЕНИЙ НА ВЫСОТНОЙ МЕТЕОМАЧТЕ

**Abstract.** Based on the results of actual measurements of wind speeds at four meteorological masts, the vertical wind speed profile was modeled. The obtained models are verified and compared according to the existing exponential and logarithmic dependencies. The obtained analytical dependencies showed high convergence with measured wind speeds.

### Введение

Измерения параметров ветра на метеостанциях не ориентированы и во многом не удовлетворяют потребностям ветроэнергетики [1]. Помимо проблемы получения данных о скорости ветра в месте размещения ветроэлектрических установок (ВЭУ), важным для ветроэнергетических расчетов является высота измерения [2, 3]. В состав промышленных ветроэлектрических станций (ВЭС) входят ВЭУ, высоты башен которых порядка 100 и свыше метров. А для точного расчета выработки электроэнергии необходимо знать скорость ветра на высоте оси ветроколеса. Вот почему исследование высотного профиля скорости ветра является **актуальной** задачей ветроэнергетики.

**Цель работы** – разработка методики исследования и моделирования вертикального профиля скорости ветра по результатам фактических замеров на высотных метеомачтах (ММ), расположенных в Северном Причерноморье Николаевской области.

**Задача исследования** заключается в создании нового ветроэнергетического кадастра по принципу стационарных высотных измерений. Преимущество такого подхода состоит в том, что показатели получены по результатам абсолютно синхронных наблюдений, проведенных однотипными приборами и на различных высотах (31.5, 50, 60, 80, 95, 99, 100 и 101.5 м). Следует отметить, что точность измерений на ММ выше, чем точность измерений, проводимых другими методами. Недостатком последних является то, что они проводятся нерегулярно с небольшим периодом измерений. Мы же располагаем результатами измерений, проведенных на четырех ММ. Замеры на ММ в Ивановке проводились практически непрерывно в течении двух лет, на ММ в Шостаково и Лиманах – в течении года. Замеры выполнены авторитетными международными сертифицированными компаниями GEO-NET и EREDA. На ММ пилотной Аджигольской ВЭС (ПАВЭС) выполнены замеры скорости и направления

ветра прибором Logger #9200 в течении 26 месяцев на высоте 31,5 м [4] (рис. 1).



Рис. 1. Месторасположение высотных метеомачт

Фактические значения среднегодовых скоростей ветра по результатам непосредственных замеров на ММ представлены в табл. 1 и рис. 2.

Таблица 1

Замеренные на ММ значения скоростей

Ивановка		Шостаково		Лиманы		ПАВЭС	
$h$ , м	$V_{\phi}$ , м/с	$h$ , м	$V_{\phi}$ , м/с	$h$ , м	$V_{\phi}$ , м/с	$h$ , м	$V_{\phi}$ , м/с
50	6,468	50	6,1	60	6,93	31,5	6,196
80	7,038	80	6,7	80	7,28		
100	7,335	100	7,1	95	7,50		
101,5	7,368	101,5	7,1	99	7,61		

Для удобства выполнения дальнейшего исследования выполнено приведение результатов замеров на ММ к единым высотам в 50 м, 80 м и 100 м. Для этого для ММ Лиманы по фактическим значениям было составлено линейное корреляционное уравнение вида:

$$V = 0,0169 \cdot h + 5,9158. \quad (1)$$

Наличие данных с ММ ПАВЭС на единственной высоте делает невозможным составление соответствующего корреляционного уравнения. Поэтому в дальнейшем исследовании данные с ММ ПАВЭС не применяются.

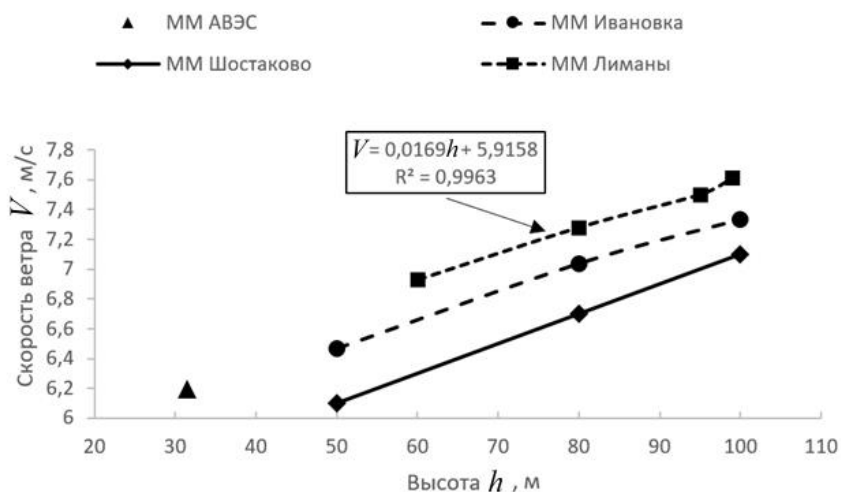


Рис. 2. Фактические среднегодовые скорости ветра по результатам замеров на ММ

По уравнению (1) методом экстраполяции определены значения скоростей ветра в месте расположения ММ Лиманы на высотах 50 и 100 м (табл. 2).

Таблица 2

Корреляция скоростей ветра на ММ Лиманы

Ивановка		Шостаково		Лиманы	
$h$ , м	$V$ , м/с	$h$ , м	$V$ , м/с	$h$ , м	$V$ , м/с
50	6,468	50	6,1	50	6,76
80	7,038	80	6,7	80	7,28
100	7,335	100	7,1	100	7,61

По табл. 2 определим зависимость изменения скорости ветра  $\Delta V_1$  с ростом высоты  $h$  на 1 м. Для этого разницу скоростей ветра соседних высот разделим на разницу данных высот, т.е.:

$$\Delta V_1 = \frac{V_2 - V_1}{h_2 - h_1} = \frac{\Delta V_{2-1}}{\Delta h_{2-1}}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3. Из нее видно, что с ростом высоты на 1 м скорость ветра  $V$  в среднем увеличивается на 0,018 м/с, т.е.:

$$V_2 = V_1 + 0,018(h_2 - h_1). \quad (2)$$

Таблица 3

## Рост скорости с ростом высоты

	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$\Delta h_{2-1}$	$V_1, \text{ м/с}$	$V_2, \text{ м/с}$	$\Delta V_{2-1}$	$\Delta V_1$
Ивановка	50	80	30	6,468	7,038	0,570	0,019
	80	100	20	7,038	7,335	0,297	0,015
	Среднее $\Delta V_1$						0,017
Шостаково	50	80	30	6,1	6,7	0,6	0,02
	80	100	20	6,7	7,1	0,4	0,02
	Среднее $\Delta V_1$						0,02
Лиманы	50	80	30	6,76	7,28	0,52	0,017
	80	100	20	7,28	7,61	0,33	0,017
	Среднее $\Delta V_1$						0,017
Среднее $\Delta V_1$ по всем ММ							0,018

Определим погрешность предложенного метода путем восстановления фактических значений скоростей ветра  $V_\phi$  табл.1 по единственному замеренному значению среднегодовой скорости ветра на определенной высоте.

В качестве исходных данных возьмем данные на наименьших высотах, т.е. 50 м для ММ Ивановка и Шостаково и 60 м для ММ Лиманы (табл. 4).

Таблица 4

## Оценка погрешностей

Ивановка					Шостаково					Лиманы				
$h, \text{ м}$	$V_\phi, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_\phi, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_\phi, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$
50	6,468	—	—	—	50	6,1	—	—	—	60	6,93	—	—	—
80	7,038	7,008	0,030	0,4	80	6,7	6,64	0,06	0,9	80	7,28	7,29	0,01	0,1
100	7,335	7,368	0,033	0,5	100	7,1	7,0	0,1	1,4	95	7,50	7,56	0,06	0,8
101,5	7,368	7,395	0,027	0,4	101,5	7,1	7,0	0,1	1,4	99	7,61	7,63	0,02	0,3
Ср. значение			0,030	0,4	Ср. значение			0,087	1,2	Ср. значение			0,03	0,4

Ввиду того, что расстояние между ММ Ивановка и ММ ПАВЭС составляет всего 8 км, основываясь на данных ММ Ивановка по уравнению (2) определим скорость ветра на ПАВЭС и сопоставим с фактическим значением [5].

$$V_{31,5} = 6,468 + 0,018(31,5 - 50) = 6,468 - 0,333 = 6,135 \text{ м/с},$$

т.е. погрешность определения скорости ветра в месте расположения ПАВЭС по уравнению (2) составила -0,061 м/с или менее -1 %, что убеждает в достоверности полученной зависимости как минимум в диапазоне от 30 до 100 м.

Для экстраполяции изменения скорости ветра на различных высотах в ветроэнергетике используют несколько способов.

### Степенной закон вертикального профиля

Степенной закон изменения скорости ветра с высотой впервые в начале XX века в практику расчетов ввел Хеллман [6, 7]:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (3)$$

где  $m$  – безразмерный показатель степени (или показатель Хеллмана), значение которого зависит от устойчивости атмосферы и шероховатости подстилающей поверхности и определяется из уравнения (3):

$$m = \frac{\ln(V_2/V_1)}{\ln(h_2/h_1)}.$$

Определим значение  $m$  по имеющимся данным с ММ (табл. 5).

Таблица 5

Определение степенного показателя

	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$V_1, \text{ м/с}$	$V_2, \text{ м/с}$	$m$
Ивановка	50	80	6,468	7,038	0,18
	80	100	7,038	7,335	0,185
	Среднее $m$				0,183
Шостаково	50	80	6,1	6,7	0,2
	80	100	6,7	7,1	0,26
	Среднее $m$				0,23
Лиманы	50	80	6,76	7,28	0,158
	80	100	7,28	7,61	0,199
	Среднее $m$				0,179
	$h_1, \text{ м}$		$h_2, \text{ м}$		$m$
Среднее $m$ по всем ММ	50		80		0,179
	80		100		0,215
	Среднее $m$				0,197

Увеличение значения  $m$  с ростом высоты (по ММ Шостаково и Лиманы – существенное, на 30 % и 26 % соответственно), а также существующая разница в значениях данного показателя для различных ММ показывают, что применение осредненного значения показателя  $m = 0,197$  может привести к существенным отклонениям результатов расчетов от фактических данных.

Скорость ветра на интересующей высоте из уравнения (3) по результатам табл. 5 будет:

$$V_2 = V_1 \cdot \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{0,197}. \quad (4)$$

Для проверки точности полученной зависимости (4) по существующему алгоритму определим скорости ветра на различных высотах, основываясь на значениях скоростей ветра на высотах 50 и 60 м (табл. 6).

Таблица 6

Погрешность в определении скоростей

Ивановка					Шостаково					Лиманы				
$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$
50	6,468	–	–	–	50	6,1	–	–	–	60	6,93	–	–	–
80	7,038	7,095	0,057	0,8	80	6,7	6,692	-0,008	-0,1	80	7,28	7,334	0,054	0,7
100	7,335	7,414	0,079	1,1	100	7,1	6,993	-0,107	-1,5	95	7,50	7,587	0,087	1,16
101,5	7,368	7,436	0,068	0,9	101,5	7,1	7,013	-0,087	-1,2	99	7,61	7,649	0,039	0,5
Ср. значение			0,068	0,9	Ср. значение			-0,067	-0,9	Ср. значение			0,06	0,8

Теперь определим значение скорости ветра на ММ ПАВЭС по данным ММ Ивановка на высоте 50 м:

$$V_{31,5} = 6,468 \cdot \left( \frac{31,5}{50} \right)^{0,197} = 5,905 \text{ м/с.}$$

Отклонение от фактического значения составило  $-0,291$  м/с или  $-4,7 \%$ .

### Логарифмическая зависимость

Наряду со степенным законом экстраполяции изменения скорости ветра используется также логарифмическая зависимость вида [7, 8]:

$$V_h = V_{10} [0,233 + 0,656 \cdot \log(h + 4,75)], \quad (5)$$

где  $V_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м (стандартная высота расположения флюгера).

По фактическим значениям скорости ветра на высотах 50 и 60 м и уравнению (5) определена скорость ветра на высоте флюгера  $V_{10}$ , вычислены скорости ветра  $V_{ур}$  на остальных высотах и сопоставлены с фактическими значениями  $V_{\phi}$  (табл. 7).

Таблица 7

Погрешность в определении скоростей

Ивановка					Шостаково					Лиманы				
$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$	$h, \text{ м}$	$V_{\phi}, \text{ м/с}$	$V_{ур}, \text{ м/с}$	$\Delta V, \text{ м/с}$	$\Delta V, \%$
50	6,468	–	–	–	50	6,1	–	–	–	60	6,93	–	–	–
10	–	4,71	–	–	10	–	4,442	–	–	10	–	4,876	–	–
80	7,038	7,054	0,016	0,2	80	6,7	6,653	-0,047	-0,7	80	7,28	7,304	0,024	0,3
100	7,335	7,339	0,004	0,1	100	7,1	6,921	-0,179	-2,5	95	7,50	7,53	0,03	0,4
101,5	7,368	7,358	-0,01	-0,1	101,5	7,1	6,939	-0,161	-2,3	99	7,61	7,585	-0,025	-0,3
Ср. значение			0,01	0,1	Ср. значение			-0,129	-1,8	Ср. значение			0,01	0,1

Теперь определим скорость ветра на ПАВЭС на высоте 31,5 м по данным ММ Ивановка по уравнению (5):

$$V_{31,5} = 4,71[0,233 + 0,656 \cdot \log(31,5 + 4,75)] = 5,915 \text{ м/с},$$

т.е. отклонение от фактического значения составило – 0,281 м/с или – 4,5 %.

### **Выводы**

Моделирование вертикального распределения скорости ветра по измерениям на ММ показало:

1. В интервалах высот, используемых в строительстве промышленных ВЭС, установлен однозначный рост скорости ветра с ростом высоты в независимости от расположения ММ и среднегодовых значений скорости ветра.

2. Сопоставление полученных аналитических зависимостей показывает их высокую сходимость с замеренными значениями скоростей.

1. *Васько П.Ф.* Определение технических показателей эффективности использования агрегатов в Украине / П.Ф. Васько, А.А. Брыль, П.П. Пекур // Энергетика и электрификация. – 1995. – № 2. – С.48-51.

2. *Киселева С.В.* Оценка технического потенциала энергии ветра и солнца / С.В. Киселева, Ю.Ю. Рафикова // Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум / Под. Ред. А.А. Соловьева. – М.: «Университетская книга», 2013. – 156 с. – С.25-34.

3. Патент на корисну модель № 132212 Укр., GOIP 5/00. Спосіб визначення вертикального розподілу модуля швидкості вітру в приземному шарі атмосфери / Подгуренко В.С., Терехов В.Є., Гетманець О.М., Черепанов А.І., опубл. 11.02.2019р., Бюл. №3.

4. *Подгуренко В.С.* Нетрадиційні джерела енергії: Навчальний посібник / В.С. Подгуренко – Миколаїв: НУК, 2007. – 116 с.

5. Опыт Аджигольской ветровой электростанции в привлечении инвестиций. / В.С. Подгуренко // Энергетика: проблеми та перспективи. Погляд громадськості (Збірка № 4) – Київ, Энергетика та електрифікація, 2007. – С.100-104.

6. Техническая энциклопедия. Т. 3. Второе изд., испр. и доп. – М.: ОНТИ НК ТП СССР, 1937. – С. 702.

7. *Швень Н.И.* Зависимость скорости ветра в приземном слое от защищенности ветроизмерительных приборов / Н.И. Швень // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – 2010. – Вип. 1. – С.116-120.

8. *Онінко О.Ф.* Вітроенергетика та енергетична стратегія / О.Ф. Онінко, Б.П. Коробко, В.М. Миханюк – Київ: УАН, Фенікс. 2008. – 168 с.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3860756>

*Поступила 10.10.2019р.*