

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Захидов Р.А., Таджиев У.А., Орлова Н.И., Киселева Е.И., Анарбаев А.И.  
Институт энергетики и автоматики Академии Наук Республики Узбекистан  
E-mail: [ipea@uzsci.net](mailto:ipea@uzsci.net)

Ограниченность запасов газообразных, жидких, твердых видов углеводородного сырья, необходимость их использования как исходного продукта для нужд газонефтехимической отрасли и замещения их в топливно-энергетическом балансе Узбекистана другими видами первичных энергоресурсов в особенности экологически безопасными возобновляемыми источниками энергии, в частности энергией ветра, является актуальной проблемой, в том числе с точки зрения обеспечения энергетической безопасности страны в среднесрочной перспективе. Возможность использования энергии ветра приповерхностных (10÷20м. над уровнем земли) слоёв атмосферы на территории Узбекистана продемонстрирована опытом создания и эффективного функционирования ветро-солнечных энергокомплексов малой мощности с применением ветроэлектростанций (ВЭУ) с единичной мощностью от 1 кВт до 6 кВт в различных регионах страны. Прогресс, достигнутый в мире по созданию и широкому коммерческому использованию энергоэффективных, высокоавтоматизированных, технически совершенных ВЭУ повышенной мощности (до 2 МВт), создаёт благоприятные возможности по развитию ветроэнергетики и в странах центральноазиатского региона, в том числе в Узбекистане, учитывая, что на повышенных высотах ( $z = 20 \div 100$  м и больше) над поверхностью земли в среднем скорости ветра выше, чем на уровне  $z_{\phi} = 10-11$  м., на котором, как правило, осуществляется измерение скорости ветра на метеостанциях (МС) гидрометеорологической службы (ГМС) для нужд сельского и коммунального хозяйства, промышленности, прогноза погоды и т.д. Так как в соответствии с паспортными данными роторы ВЭУ средней мощности ометают слой атмосферы толщиной  $\Delta z$  от 20-30 до 50-70 м., а большой – до 100-140 м., то для более точного определения характеристик работы ВЭУ повышенной мощности необходимо учитывать изменение характеристик ветрового потока на высотах до 70 м для ВЭУ средней и до 100-140 м для ВЭУ МВт-ной мощности. Однако систематические наблюдения за скоростью ветра в этом интервале высот в Узбекистане практически не производились, а информация о расчетных исследованиях отсутствовала.

В этой связи целью данной работы является обобщение результатов работы, проведенной авторами по оценке энергетических и временных характеристик работы ВЭУ средней и большой мощности с учетом вертикальной изменчивости скорости ветра в приземном слое атмосферы путем использования методов математического моделирования [1-4].

Среднее количество энергии, вырабатываемой ВЭУ ( $\bar{W}$ ), и время её работы ( $\bar{\tau}$ ), рассчитываются по алгоритму аналогичному применяемому для расчетов по скоростям ветра, измеренным флюгером на высоте  $z_{\phi} = 10 - 11$  м [5]. Однако при расчетах на высотах  $z$  необходимо учитывать не только величину  $z$ , но и тип температурной стратификации атмосферы (ТСА). В связи с тем, что тип ТСА ( $j$ ) зависит от времени суток и года [1], то расчет должен производиться по срокам наблюдений для каждого месяца. В общем виде  $\bar{W}$  и  $\bar{\tau}$  для каждого срока наблюдений определяются как средневзвешенное

$$\bar{W}_{zj} = \frac{\sum_{c_{pH}}^{c_{pk}} n_i(c_{zj}) \cdot P_i(c_{zj})}{\sum_{c_{pH}}^{c_{pk}} n_i(c_{zj})} \cdot \bar{\tau}_{pzj} = 3 \cdot \sum_{c_{pH}}^{c_{pk}} n_{ik}(c_{zj}) \cdot P_i(c_{zj}) \quad (1),$$

где  $n_i(c_{zj})$  – повторяемость скоростей ветра  $c_{zj}$  на высоте  $z$  при  $j$ -той ТСА:  $j = 1, 2, 3$  и соответствует: 1 – устойчивой; 2 – неустойчивой; 3 – безразличной (равновесной) ТСА;  $P_i(c_{zj})$  – мощность, вырабатываемая ветрогенератором при скорости  $c_{zj}$ ;  $\bar{\tau}_{pzj}$  – среднее время работы ВЭУ на высоте  $z$  при  $j$ -той ТСА. Суммирование производится по интервалу рабочих скоростей ветра от рабочей начальной (стартовой) до рабочей конечной.

Среднее время работы для каждого срока наблюдений определяется в предположении, что в течение  $\pm 1,5$  часов от срока наблюдения скорость ветра не пересекает границ  $c_{pH}$  и  $c_{pk}$  [5]. Тогда

$$\bar{\tau}_{pzj} = 3 \cdot \frac{\sum_{c_{pH}}^{c_{pk}} n_i(c_{zj})}{\sum_0^{\infty} n_i(c_{zj})} = 3 \cdot \sum_{c_{pH}}^{c_{pk}} n_i(c_{zj}) \quad (2),$$

т.к. повторяемости  $n_i(c_{zj})$  рассчитывались в долях единицы.

При этом, также как при расчете характеристик ветрового потока [1] полагаем, что все  $c_i$  скорости увеличатся в  $k_j$  раз, а их повторяемости не изменятся.

Среднее количество энергии, вырабатываемой за сутки  $k$ -го месяца, за  $k$ -тый месяц и за год получаются соответствующим суммированием по срокам за сутки, месяц и год. Аналогично суммируется длительность работы ВЭУ.

Для выполнения расчетов по приведенным формулам необходимо решить 2 задачи: рассчитать вертикальные профили скорости ветра с учетом ТСА и оценить, как влияют высота расположения оси (H) и радиус ротора (R) ветротурбины (ВТ) ВЭУ на среднюю по ометаемой поверхности ВТ скорость ветрового потока.

Для выбора способа расчета вертикального профиля скорости ветра был проанализирован ряд источников и выявлено, что распределение скорости ветра с высотой описывается логарифмическим законом в случае равновесной ТСА и степенным – в случаях устойчивой и неустойчивой стратификаций. При этом показатель степени  $m$  и параметр  $z_0$ , характеризующий степень шероховатости подстилающей поверхности и входящий в явном виде в логарифмическую функцию, зависят прежде всего от орографии, но даже для самого простого случая равнины с однородной подстилающей поверхностью они зависят от многих факторов, среди которых важнейшие: коэффициент турбулентности атмосферы, градиент температуры ( $\gamma$ ), высота приземного ( $h$ ) и пограничного слоя ( $h_1$ ), скорость ветра на уровне флюгера ( $c_\phi$ ) и на верхней границе пограничного слоя ( $c_{h1}$ ). Причем все эти факторы взаимосвязаны и изменение одного из них приводит к изменению других, пока не установится новое состояние динамического равновесия [6-8]. Однако информация, требуемая для таких расчетов для территории Узбекистана отсутствует. Так как в Узбекистане некоторые районы, перспективные для ветроэлектроспользования расположены на пустынных равнинах (плато Устюрт, Кызылкумы) [2, 4], то для оценки вертикального профиля скорости ветра ( $c_z$ ) в пределах  $z \leq h$  для равнин, подстилающую поверхность которых можно принять однородной была использована упрощенная формула [7, 8]:

$$c_z = V_g \cdot \psi(z, \varepsilon, V_g) \quad (3),$$

где  $\psi$  - коэффициент, зависящий при данной степени шероховатости поверхности  $z_0$ , от скорости геострофического ветра  $V_g$ , высоты  $z$  и параметра ТСА -  $\varepsilon$ .

При неустойчивом ( $\varepsilon \leq -0,10$ ) и равновесном ( $-0,05 \leq \varepsilon \leq 0,05$ ) состоянии атмосферы величина  $\psi$  не зависит от величины  $V_g$  при изменении её в интервале  $5 \leq V_g \leq 15 \text{ м/с}$ , охватывающем практически все встречающиеся значения  $V_g$ . При устойчивом состоянии ( $\varepsilon \geq 0,10$ ) зависимость  $\psi$  от  $V_g$  нужно учитывать.

В таблице 1 приведены коэффициенты  $\psi$ , рассчитанные для открытой ровной поверхности ( $z_0 = 0,018 \text{ м}$ ) [7, 8].

Таблица 1.

Величины коэффициентов  $\psi$  при различных условиях ТСА и изменении  $V_g$  от 5 до 15  $\text{м/с}$ .

Стратификация, $\varepsilon$	$V_g, \text{ м/с}$	$z, \text{ м}$									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\leq -0,10$	$5 \div 15$	0,66	0,70	0,73	0,74*	0,75	0,757*	0,764*	0,77	0,775*	0,78
$-0,05 \div 0,05$	$5 \div 15$	0,60	0,66	0,69	0,71*	0,73	0,74*	0,75*	0,76	0,77*	0,78
$\geq 0,10$	5	0,65	0,73	0,80	0,835	0,87	0,90				
	10	0,60	0,68	0,73	0,76	0,79	0,825	0,85	0,875	0,895	0,91*
	15	0,55	0,625	0,68	0,72	0,75	0,775	0,81	0,83	0,85	0,87

Примечание. Значения  $\psi^*$  получены интерполяцией между соседними величинами  $\psi$ .

Если известна величина скорости ветра  $c_1 = c_\phi$  на какой-либо высоте  $z_1 = z_\phi$  (расположения флюгера на МС), то скорости  $c_z$  можно определить из соотношения:

$$c_z = c_\phi \cdot \frac{\psi(z, \varepsilon, V_g)}{\psi(z_\phi, \varepsilon, V_g)} \quad (4)$$

Коэффициент шероховатости  $z_0 = 0,018 \text{ м}$ , принятый при расчете коэффициентов  $\psi$ , подходит для пустынной равнины с редкой растительностью, т.к. на основании многочисленных исследований получено, что усреднено для оголенной плотной почвы  $z_0 = 0,01 \text{ м}$ , а для растительного покрова высотой 6-10 см  $z_0 = 0,02 \text{ м}$  [6, 9].

Тип температурной стратификации атмосферы определялся исходя из условия: знак градиента температуры (и тип температурной стратификации) сохраняется во всем приземном слое [9]. Это даёт возможность определить его по разности температур почвы ( $T_n$ ) и воздуха ( $T_g$ ) на высоте 2 м, измеряемых на МС в стандартные сроки наблюдений [10].

В соответствии с этим была модифицирована программа расчета статистических и режимных характеристик ветрового потока [5] и в неё введена подпрограмма для определения типа ТСА по величинам  $T_g$  и  $T_n$ . Так как тип стратификации атмосферы меняется в течение суток и года, то все расчеты  $c_{zi}$  должны производиться по срокам наблюдений  $c_{\phi i}$  для каждого месяца.

Для проверки правомочности использования выбранного способа расчета вертикального профиля скорости в равнинных пустынях Узбекистана в качестве опорной была принята МС Тамды, так как а) она расположена в центральной части пустыни Кызылкум, почва на метеоплощадке – связанный песок; б) повторяемость штилей невелика, меняется от 7% до 10% в разные месяцы и в среднем за год составляет 9% [10], что увеличивает точность расчетов; в) для этой МС в специальной литературе есть данные систематических аэрологических наблюдений.

Для контроля аналогичные расчеты были произведены для МС Самарканд, агро, расположенной на предгорной равнине, и МС Чимбай в Каракалпакистане. Сопоставление величин  $\Delta T$  на этих МС показало, что сами разности по величине различаются, но знаки их

и время перехода через  $0^{\circ}\text{C}$  одинаковы в течение суток и года. Это подтверждает, что температурный режим пустынных равнин Узбекистана однотипен и для определения типа ТСА на таких территориях можно пользоваться данными МС Тамды [1].

По модифицированной программе расчетов скоростей ветра и удельных мощностей ветрового потока были произведены расчеты средних месячных скоростей ветра по срокам наблюдений  $\bar{c}_{zk_i}$  для  $z$  от  $z_{\phi} = 10\text{м}$  до  $120\text{ м}$  с шагом  $\Delta z = 10\text{м}$ , а также их статистических характеристик и средних удельных мощностей ветрового потока ( $\bar{w}_{zk_i}$ ) по данным  $c_{\phi i}$  для МС Тамды (при  $V_g = 10\text{м/с}$ ). По этим данным были получены средние месячные и годовые величины  $\bar{c}_{zk}$ ,  $\bar{c}_{zz}$  и  $\bar{w}_{zk}$  и  $\bar{w}_{zz}$ . Результаты проведенного анализа полученных зависимостей  $\bar{c}_z$  от  $z$ , их изменчивости в течение суток и года, а также сопоставления с имеющимися литературными данными подтвердили корректность использованного способа расчета величин  $\bar{c}_z$  и  $\bar{w}_z$  [1].

С помощью этой программы были затем рассчитаны вертикальные профили характеристик ветрового потока на плато Устюрт (район МС Жаслык и Каракалпакия) – одном из наиболее перспективных районов для ветроэлектроиспользования [2].

Для решения вопроса о корректности замены средней скорости по площади, ометаемой ротором ВТ, на скорость на уровне оси ротора были проанализированы коэффициенты пересчета  $k_{zj} = c_{zj}/c_{\phi j}$  для всех значений  $j$  для реальных ВЭУ средней, повышенной (и малой) мощности и установлено, что в пределах приземного слоя атмосферы погрешность при такой замене не превышает 1% [3]. Следовательно, в пределах принятой нами модели вертикального градиента скорости ветра для пустынных равнин с подстилающей поверхностью, которую можно считать однородной, при расчетах характеристик работы ВЭУ можно использовать величину скорости на уровне оси ротора ВТ. Это значительно упрощает алгоритм расчета энергетических и временных характеристик работы ВЭУ.

В соответствии с разработанной моделью расчета энергетических и временных характеристик работы ВЭУ повышенной мощности с учетом вертикального градиента скорости ветра для района МС Жаслык и Каракалпакия (плато Устюрт) для  $z: z_{\phi} = 10\text{м.}$ ,  $z = H$  (высота расположения оси ВТ) и  $z = 70\text{м}$  были рассчитаны величины  $\bar{W}$  и  $\bar{\tau}$ : среднемесячные по срокам наблюдений, средние за каждый месяц и в целом за год, а также их суточные и годовые амплитуды ( $A$ ) и коэффициенты использования номинальной мощности ( $\xi$ ). В качестве примера в таблице 2 приведены среднегодовые величины  $\bar{W}_{zz}$  (МВтч),  $A$  и  $\xi$  для МС Жаслык.

Среднегодовые характеристики работы ВЭУ, рассматриваемых типономиналов.

Анализ приведенных оценок среднегодовых энергетических характеристик работы ВЭУ и длительности их работы позволяют сделать следующие основные выводы:

- количество энергии, вырабатываемой всеми рассмотренными типами ВЭУ и длительность их работы увеличивается с ростом высоты  $z$  (в пределах приземного слоя атмосферы);
- при увеличении  $z$  на одинаковую величину (от 10 до 70 м) прирост  $\Delta \bar{W}_{zz}$  и  $\Delta \tau_{zz}$  зависят от типа ВЭУ (номинальной мощности  $P_n$  и характера зависимости  $P(c)$ , в частности, от величин  $c_{pn}$  и  $c_{pk}$ );
- коэффициент использования номинальной мощности растет с высотой, но для ВЭУ повышенной мощности  $\xi < 20\%$ .

Таблица 2

Тип ВЭУ	$z, \text{м}$	$\bar{W}_{ze}, \text{МВтч}$	$A, \%$	$\bar{\xi}_{ze}$	Тип ВЭУ	$z, \text{м}$	$\bar{W}_{ze}, \text{МВтч}$	$A, \%$	$\bar{\xi}_{ze}$
ТW-60 $P_H=60\text{кВт}$	10	111,69	58,0	0,21	АВЭ-250С $P_H=250\text{кВт}$	10	253,66	73,1	0,145
	30	144,28	54,6	0,27		25	336,53	66,4	0,19
	40	150,76	53,8	0,29		70	433,17	59,8	0,25
	70	168,25	50,9	0,32		М750-	10	376,31	81,2
ТW-80 $P_H=80\text{кВт}$	10	126,24	68,4	0,18	400/100 $P_H=400\text{кВт}$	35	562,14	73,3	0,16
	40	177,49	59,4	0,25		70	688,24	70,0	0,20
	70	203,36	55,8	0,29		10	385,63	90,8	0,09
ТW-250 $P_H=250\text{кВт}$	10	225,08	85,3	0,10	ВЭУ-500 $P_H=500\text{кВт}$	35	599,44	84,3	0,14
	30	330,14	85,2	0,15		70	764,42	79,0	0,17
	55	398,10	75,4	0,18	ВЭУ-630 $P_H=630\text{кВт}$	10	432,97	91,2	0,08
	70	423,90	73,7	0,19		35	688,36	85,6	0,12
ТW-500 $P_H=500\text{кВт}$	10	438,89	88,4	0,10		70	868,10	81,0	0,16
	40	708,88	78,8	0,16					
	70	841,24	74,0	0,19					

### Литература

1. Н.И.Орлова, У.А.Таджиев, Р.А.Захидов, А.И.Анарбаев. Расчет вертикального профиля и мощности ветрового потока на пустынных равнинах. Гелиотехника, 2008, № 4, с. 81-88.
2. А.И.Анарбаев, Р.А.Захидов, Н.И.Орлова, У.А.Таджиев. Об оценке вертикального профиля скорости ветра и удельной мощности ветрового потока на плато Устюрт по данным наблюдений на метеостанциях. Гелиотехника, 2009, № 1, с. 80-88.
3. У.А.Таджиев, Р.А.Захидов, Н.И.Орлова, А.И.Анарбаев, М.У.Таджиев. Численное исследование режимов работы ветроэлектрических установок повышенной мощности на равнинах Узбекистана с учетом вертикальной изменчивости скорости ветра. Часть 1. Гелиотехника, 2009, № 2, с. 71-80.
4. У.А.Таджиев, Р.А.Захидов, Н.И.Орлова, А.И.Анарбаев, М.У.Таджиев. Численное исследование режимов работы ветроэлектрических установок повышенной мощности на равнинах Узбекистана с учетом вертикальной изменчивости скорости ветра. Часть 2. Гелиотехника, 2009, № 2, с. 90-97.
5. Р.А.Захидов, Е.И.Киселева, Н.И.Орлова, У.А.Таджиев. Численное моделирование режимов ветровых потоков и работы ветроэлектроустановок. Гелиотехника, 1995, № 4, с. 90-97.
6. П.А.Воронцов. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1966, 296с.
7. Д.Л.Лайхтман, Л.Р.Орленко, Г.Х.Цейтин. Методы оценки ветровых ресурсов по полю давления. Сб. «Методы разработки ветроэнергетического кадастра, М., Изд. АН СССР, 1963, с. 5-25.
8. Д.Л.Лайхтман. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970, 342с.
9. П.Н.Тверской. Курс метеорологии (физика атмосферы). Л., Гидрометеиздат, 1962, 700с.
10. Научно прикладной справочник по климату СССР. Сер.3, ч. 1-6, кн. 1, вып. 19, Л., Гидрометеиздат, 1989, 279с.