

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

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 ветроэлектроэнергетики 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 Δz 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 (γ), высота приземного (h) и пограничного слоя (h_1), скорость ветра на уровне флюгера (c_ϕ) 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 ветроэлектростроительства 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 ψ - коэффициент, зависящий при данной степени шероховатости поверхности z_0 , от скорости геострофического ветра V_g , высоты z и параметра ТСА - ε .

При неустойчивом ($\varepsilon \leq -0,10$) и равновесном ($-0,05 \leq \varepsilon \leq 0,05$) состоянии атмосферы величина ψ 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 ψ от V_g нужно учитывать.

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

Таблица 1.

Величины коэффициентов ψ при различных условиях ТСА и изменении V_g от 5 до 15 м/с .

Стратификация, ε	$V_g, \text{ м/с}$	$z, \text{ м}$									
		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 ψ^* получены интерполяцией между соседними величинами ψ .

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 ψ , 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 ΔT на этих МС показало, что сами разности по величине различаются, но знаки их

и время перехода через 0°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 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 (ξ). В качестве примера в таблице 2 приведены среднегодовые величины \bar{W}_{zz} (МВтч), A и ξ 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.