

УДК 621.311.245 (575.2)

### ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КЫРГЫЗСТАНА

*И.А. Аккозиев, Б.М. Максатов, Г.В. Дерюгина, Т.А. Шестопалова*

Топливо-энергетический комплекс Кыргызстана является энергодефицитным. Для снижения энергодефицита в работе предлагается строительство крупной ВЭС в районе озера Иссык-Куль суммарной мощностью 40 МВт. В работе приводится: обоснование выбора площадки под строительство ВЭС по данным предварительно рассчитанных ветроэнергетических ресурсов всей территории Кыргызстана на высоте 10 м; выбор модели ВЭУ и их количества в составе ВЭС.

*Ключевые слова:* ветроэлектрическая станция; вертикальный профиль ветра; коэффициент Хеллмана; энергия ветра; энергоэффективность.

### КЫРГЫЗСТАНДАГЫ ЭНЕРГОСИСТЕМАНЫН КУРАМЫНДА ШАМАЛ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫ

Кыргызстандын отун-энергетикалык комплекси энергиянын тартыштыгы менен айырмаланат. Бул эмгекте энергиянын тартыштыгын төмөндөтүү үчүн Ысык-Көлдө жалпы кубаттуулугу 40 МВт болгон ири Шамал электр станциясын куруу сунушталат. Эмгекте төмөнкүлөр чагылдырылган: Кыргызстандын бүткүл аймагындагы 10 метр бийиктиктеги шамал энергиясы ресурстарынын алдын ала эсептелген маалыматтары боюнча Шамал электр станциясын куруу үчүн аянтчаны тандоого негиздеме берилет; Шамал электр генераторунун моделдерин тандоо жана Шамал электр станциясынын курамындагы алардын саны.

*Түйүндүү сөздөр:* Шамал электр станциясы; шамалдын вертикалдуу профили; Хеллмандын коэффициенти; шамалдын энергиясы; энергиянын натыйжалуулугу.

### WIND POWER PLANT AS PART OF THE ENERGY SYSTEM OF KYRGYZSTAN

*I.A. Akkoziev, B.M. Maksatov, G.V. Derugina, T.A. Shestopalova*

The fuel and energy complex of Kyrgyzstan is energy-deficient. To reduce the energy deficit in the work, it is proposed to build a large wind farm near Issyk-Kul Lake with a total capacity of 40 MW. The paper presents the rationale for the choice of site for the construction of a wind power station according to the previously calculated wind energy resources of all territory of Kyrgyzstan at the height of 10 m; selection of a model of wind electrical installation and their number in the wind farm.

*Keywords:* wind power plant; vertical wind profile; Hellman coefficient; wind energy; energy efficiency.

В Кыргызской Республике эксплуатируется 18 электрических станций, включая 16 ГЭС и 2 теплоэлектроцентрали, расположенные в городах Бишкек (812 МВт) и Ош (50 МВт). Электрическая сеть включает линии электропередачи напряжением 0,4–500 кВ общей протяженностью 86 820 км. Распределительные электрические сети выполнены на напряжение 0,4–35 кВ. Для теплоснабжения городов Бишкек и Ош в республике эксплуатируются 493,2 км тепловых сетей. Учитывая географическое положение и природно-климатические условия, территория республики разделена на семь экономических областей с двумя промышленно развитыми городами. Наличие тепловых и электрических сетей

напряжением 0,4–500 кВ, гидроэлектростанций и тепловых электроцентралей в совокупности образуют электроэнергетическую систему страны. Энергосистема Кыргызстана имеет возможность производить, транспортировать и распределять электроэнергию не только внутри страны, но и осуществлять экспорт, импорт и взаимные перетоки в соседние государства (Казахстан, Узбекистан, Таджикистан), участвовать в покрытии дефицита мощности и покрывать пиковые нагрузки в энергосистемах стран Центральной Азии. Электроэнергетика республики обладает рядом специфических особенностей, которые оказывают влияние на перспективное развитие отрасли и диктуют необходимость реформ в энергетике [1].

Кыргызстан имеет благоприятные климатические и погодные условия для эффективного использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнце, ветер, вода. Республика на данный момент имеет огромный гидроэнергетический потенциал, но, к сожалению, из-за политических и экономических соображений, страна не может строить большие ГЭС. Развитию малой гидроэнергетики препятствует замерзание рек в зимний период, что делает их неэффективными. Наиболее перспективна солнечная энергетика, так как в Кыргызстане насчитывается более 300 солнечных дней в году. Ветровая энергетика не столь эффективна, так как 90 % территории страны – это горная местность, что создает трудности в проектировании при моделировании потоков ветра в условиях гор по данным метеостанций, расположенных на равнинной местности, и выборе площадки для ВЭС. Однако в стране есть территории, где скорость ветра и ландшафт местности позволяют строить ВЭС. Развитие биоэнергетики позволит стране сократить зависимость в поставках газа от Узбекистана (ежегодно страна покупает около 350 млн куб. м газа). Потенциал собираемого навоза в стране составляет 7,5 млн тонн. Переработка такого количества навоза с помощью биогазовых установок может дать стране 200 млн куб. м газа [2].

Для выбора перспективных площадок под строительство ВЭС в Кыргызстане был проведен расчет ветроэнергетического потенциала по многолетним рядам наблюдений (с 1995 г. по н.в.) за скоростью (на высоте 10 м) и направлениями ветра на площадках 20-и наземных метеостанций (МС) с сайта «Погода России» [3]. Были рассчитаны следующие основные энергетические характеристики ветра: среднегодовое значение скорости ветра  $V_o$ , удельная валовая мощность  $N_{yo}$ , коэффициент вариации  $C_v$ . По территории Кыргызстана они меняются в широком диапазоне:  $V_o$  от 0,1 м/с (МС Суусамыр) до 3,9 м/с (МС Иссык-Куль);  $N_{yo}$ : 16–538 Вт/м<sup>2</sup>;  $C_v$ : 0,6–26,6. Результаты расчета позволили построить карту с распределением среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м (рисунок 1), анализ которой показал, что на большей части территории Кыргызстана строительство ВЭС неэффективно; наиболее перспективно использовать энергию ветра в северо-восточной части Кыргызстана, а именно, в Иссык-Кульской области (МС Иссык-Куль, МС Каракол).

Для размещения ВЭС была выбрана площадка около города Балыкчи недалеко от МС Иссык-Куль и оценена свободная (доступная) площадь под ее размещение – 20 км<sup>2</sup>. При выборе площадки ВЭС, помимо ветровой активности, учитывалась транспортная доступность площадки и возмож-

ность присоединения ВЭС к существующей ЛЭП (220 кВ).

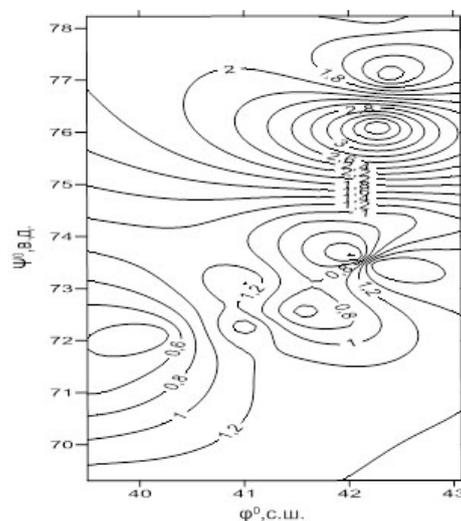


Рисунок 1 – Карта распределения среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м по территории Кыргызстана

Поскольку данные о поступлении ветровой энергии на МС Иссык-Куль в свободном доступе предоставлены только для высоты 10 м, а разработка ВЭС определяется по данным на высоте оси ветроколеса, то необходимо располагать либо фактическими данными об изменении скорости ветра по высоте, либо математическими моделями пересчета скорости по высоте. Большинство известных математических моделей вертикального профиля ветра (ВПВ) основаны на эмпирических формулах и коэффициентах, справедливых только для определенной территории. Для разработки моделей ВПВ авторами была выбрана степенная зависимость

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

где  $V(h_2)$  и  $V(h_1)$  – скорость ветра на высотах  $h_2$  и  $h_1$  над поверхностью земли в рассматриваемой точке;  $m$  – показатель степени (в зарубежной литературе показатель Хеллмана), зависящий от скорости ветра, рельефа местности, стратификации атмосферы и т. д. Точность моделирования ВПВ степенной функцией зависит в первую очередь от значения показателя Хеллмана  $m$ . Для получения математической модели определения показателя степени для условий площадки ВЭС были использованы данные 4-х аэрологических станций (АМС) Кыргызстана и Казахстана из СБД «Вертикальный профиль ветра» [4], расположенных в радиусе до 300 км от

выбранной площадки ВЭС, координаты которых и удаление от площадки ВЭС приведены в таблице 1. Критериями выбора АМС в качестве аналога для площадки ВЭС являются: удаление АМС от площадки ВЭС и идентичность рельефа местности на площадках АМС и ВЭС. Определение идентичности рельефа на площадках АМС и ВЭС производили сравнением высотных отметок и общих закономерностей формирования скорости ветра при сопоставлении годового хода среднемесячных значений скорости ветра на высоте 10 м. Поскольку средний уровень скорости ветра на площадках АМС и ВЭС неодинаков, то производили сравнение нормированных значений скорости ветра  $K_l^V$ , которые определяли по формуле

$$K_l^V = \bar{V}_l / \bar{V}_0, \quad (2)$$

где  $l$  – порядковый номер месяца;  $\bar{V}_l$  – среднемесячные значения скорости ветра на площадке (АМС и ВЭС);  $\bar{V}_0$  – среднегодовая скорость ветра на площадке. Годовой ход ветра на 4-х АМС  $\bar{V}_l^{АМС}$  был получен из СБД «Вертикальный профиль ветра», а на площадке ВЭС  $\bar{V}_l^ВЭС$  определяли по данным наблюдений на МС Исык-Куль  $V_{Ai}$  в  $l$ -ом месяце.

Критерием соответствия годового хода скорости ветра на площадках АМС и ВЭС является выполнение в течение года следующие условия:

$$\delta_l = \left| \frac{K_l^{ВЭС} - K_l^{АМС}}{K_l^{ВЭС}} \right| \cdot 100 \leq (10 \div 20)\%, \quad (3)$$

где  $\delta_l, \%$  – относительная погрешность, которая не должна превышать точность округления данных с сайта «Расписание Погоды» ( $10 \div 20\%$ );  $K_l^{ВЭС}$  и  $K_l^{АМС}$ , о.е. – нормированные значения скорости ветра на высоте 10 м на площадках ВЭС и АМС соответственно.

Таблица 1 – Координаты АМС и их удаление от площадки ВЭС

Наименование АМС	$\varphi^0$ , с.ш.	$\Psi^0$ , в.д.	h, м	Расстояние между МС и АМС, км
Алматы	43,15	76,57	848	200
Бишкек	42,52	74,36	760	200
Панфилов	43,53	77,08	670	250
Джалал-Абад	40,57	72,57	767	300

В таблице 2 и на рисунке 3 представлены годовые вариации средней месячной скорости ветра (в о.е.) на площадках 4-х АМС и МС Исык-Куль.

Наименьшие отклонения годовой вариации скорости ветра на площадках 4-х ближайших АМС

и МС Исык-Куль (см. таблицу 2 и рисунок 3) были получены на площадке АМС Бишкек, которая была выбрана в качестве аналога для построения ВПВ. На площадке АМС Бишкек по данным среднегодовых среднемесячных скоростей на высотах 10 и 100 м была получена эмпирическая зависимость  $m_l$  от среднемесячной скорости ветра  $V_l$  – на высоте 10 м:  $m_l = 0,6739 \cdot V_l^{-0,728}$  (рисунок 4).

Таблица 2 – Средние месячные скорости ветра в о.е.

Месяц	МС Исык-Куль	Алматы	Панфилов	Джалал-Абад	Бишкек
1	0,87	0,69	0,65	0,70	0,96
2	0,95	0,69	0,79	0,74	0,87
3	1,09	0,92	0,92	1,12	1,11
4	1,23	0,99	0,92	1,32	1,06
5	1,33	1,22	1,13	1,32	0,96
6	1,16	1,45	1,44	1,24	1,06
7	0,96	1,30	1,35	0,99	1,11
8	0,96	1,30	1,22	0,95	1,01
9	0,91	1,07	1,05	1,03	0,96
10	0,93	0,92	0,92	0,91	1,01
11	0,82	0,76	0,87	0,87	0,92
12	0,79	0,69	0,74	0,79	0,96

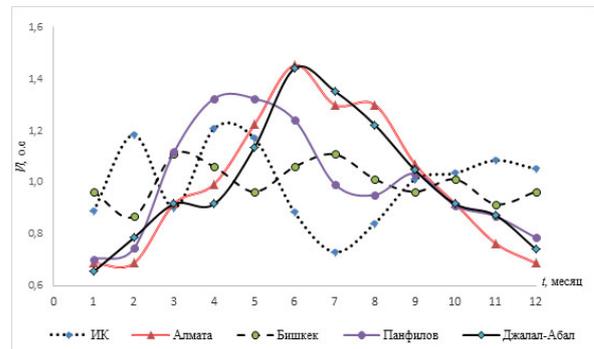


Рисунок 3 – Многолетние годовые вариации скорости ветра на площадках АМС и МС Исык-Куль

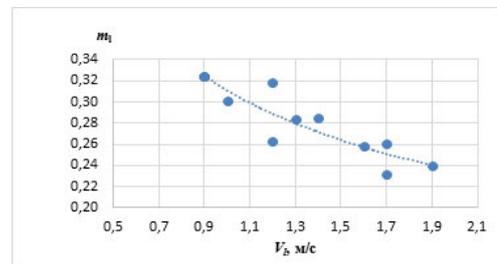


Рисунок 4 – Эмпирическая и аппроксимирующая зависимости среднемесячных показателей Хеллмана  $m_l$  от среднемесячной скорости ветра  $V_l$  на высоте 10 м по данным АМС Бишкек

Выбор модели ветроэлектрической установки (ВЭУ) должен производиться на основе технико-экономического обоснования. Но поскольку в данной работе не производился расчет экономических показателей, то выбор модели ВЭУ был осуществлен по критериям энергоэффективности с учетом климатического исполнения и класса безопасности ВЭУ в соответствии с ИЕС61400-1 из 4-х предварительно отобранных вариантов ВЭУ (таблица 3). Расчеты показали, что на площадке ВЭС могут быть установлены только ВЭУ I класса безопасности для условий холодного климата (УХЛ исполнение). В качестве основного критерия энергоэффективности было выбрано: максимальное значение коэффициента использования установленной мощности ВЭУ  $k_{нум}$ , рассчитываемое по формуле

$$K_{нум} = \mathcal{E}_{ВЭУ}(T) / (N_{ВЭУ}^{уст} \cdot T), \quad (4)$$

где  $N_{взу}$  – установленная мощность ВЭУ;  $\mathcal{E}_{ВЭУ}(T)$  – энергия, вырабатываемая ВЭУ за период времени T (один год) определяется выражением

$$\mathcal{E}_{ВЭУ}(T) = \sum_{i=1}^k N_{ВЭУ} (V_i^{ВЭУ}) \cdot \Delta t_i, \quad (5)$$

где  $V_i^{ВЭУ}$  – модельные средние скорости ветра на высоте оси ветроколеса  $h$  на площадке ВЭС;  $k$  – количество наблюдений в год;  $\Delta t_i$  – интервал времени.

Таблица 3 – Основные показатели энергоэффективности вариантов ВЭУ

Показатели	Enercon	Windtec	Enercon	Winwind
	E82/2300	WT 3000 df/120	E 101/3000	WWD-3-100
$N_{уст}$ , кВт	2300	3000	3000	3000
$H_{б}$ , м	98	100	135	88
$D_{рк}$ , м	82	120	101	100
$F$ , м <sup>2</sup>	5281	11309	8011	7853
$\mathcal{E}_{взу}$ , кВт·ч	4227398	4030322	5988834	5393753
$K_{нум}$	0,24	0,23	0,17	0,21
$\mathcal{E}_{взу}^{уд}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	800	356	747	686

В качестве дополнительного критерия использовали показатель удельной энергии с единицы ометаемой площади  $\mathcal{E}_{взу}^{уд}$

$$\mathcal{E}_{взу}^{уд} = \frac{\mathcal{E}_{взу}^{год}}{F_{ок}}. \quad (6)$$

Годовую выработку единичных ВЭУ определяли по их паспортным энергетическим характеристикам, для стандартных условий по модельному

ряду скорости ветра с 6-часовым интервалом времени за 2009 г. [5]. Основные энергетические показатели выбранных вариантов ВЭУ приведены в таблице 3.

В результате для установки на площадке ВЭС была выбрана модель ВЭУ “Enercon E82/2300” (18 шт.). Для расстановки ВЭУ на площадке ВЭС учитывали многолетнюю «розу ветров», которая имеет преобладающее 3-е направление ветра (рисунок 5). Выбрано расстояние вдоль преобладающего направления ветра –  $10 \cdot D_{рк}$  и поперек  $6 \cdot D_{рк}$ , т. е. коэффициент аэродинамических потерь  $\beta_1$  составил 0,92 [6].

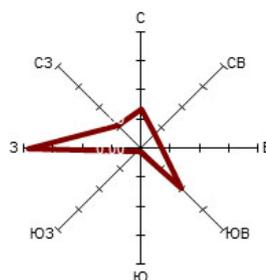


Рисунок 5 – Многолетняя «роза ветров» на площадке ВЭС

Таблица 4 – Многолетняя «роза ветров» на площадке ВЭС

Румбы	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
$t(\bar{V})$ , %	13,56	6,57	7,26	19,67	1,67	1,41	38,57	11,29

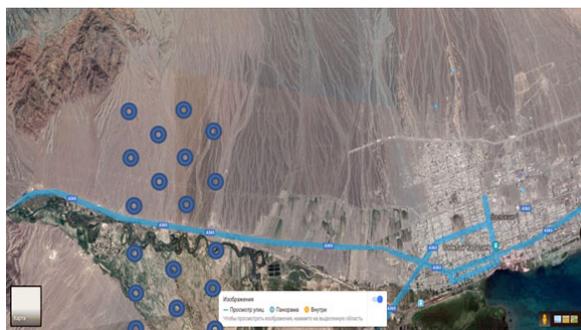


Рисунок 6 – Схема размещения ВЭУ на площадке ВЭС

В пределах выбранной площадки максимально возможное количество ВЭУ ( $Z$ ) с учетом выбранных расстояний между рядами ВЭУ и рельефа местности на площадке ВЭС составило 18 шт. (рисунок 6). В этом случае годовая выработка электроэнергии от ВЭС  $\mathcal{E}_{ВЭС}$  составит:  $\mathcal{E}_{ВЭС} = \beta_1 \cdot \mathcal{E}_{ВЭУ} \cdot Z = 0,92 \cdot 4227 \cdot 18 = 69999$  МВт·ч в год, это около 5 % от энергопотребления Кыргызстана.

**Литература**

1. URL: <http://energo-cis.ru/wyswyg/file/Kyrgyziya.pdf>
2. URL: <https://rus.azattyk.org/a/28090103.html> (дата обращения 02.11.2016)
3. Российский метеорологический сайт «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rp5.ru>
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620870. Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра» / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет МЭИ». №2012620664; заявл. 28.06.2012; опубл. 28.08.2012.
5. ГОСТ Р 54418.12.1–2011 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими. А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
6. *Дерюгина Г.В.* Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2012.