

Оценка энергетического потенциала ветровой энергии с использованием функции распределения Вейбулла

¹ИВАНОВ Валерий Анатольевич, PhD, старший преподаватель, V.ivanov@kstu.kz,

¹*БАХЫТЖАН Ақгүл Бахытжанқызы, докторант, ассистент, akgul.bakhytzhana@mail.ru,

¹ДАЙЧ Леонид Израилевич, магистр, старший преподаватель, l.daych@mail.ru,

¹ПОТЁМКИНА Елена Борисовна, магистр, старший преподаватель, bpelena75@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью данного исследования является оценка потенциала ветровой энергии в качестве альтернативного источника энергии. Выполнен расчет энергетического потенциала ветровой энергии на примере Карагандинской области за период с января 2018 по декабрь 2022 гг. Проведена оценка энергетических показателей ветра с использованием распределения Вейбулла. На основании полученных показателей можно считать энергетический потенциал ветровой энергии подходящим для системы преобразования в электроэнергию малой мощности для рассматриваемого местоположения. Ветрогенератор должен проектироваться так, чтобы соответствовать частотному распределению ветра, зависящему от времени суток, направления, погодных условий и местоположения. В связи с прерывистым характером ветра, ветровую энергию следует рассматривать не в виде самостоятельного, а в качестве дополнительного источника энергии.

Ключевые слова: энергетические характеристики ветра, скорость ветра, удельная мощность, распределение Вейбулла, альтернативные источники энергии, энергоёмкость.

Введение

Производство электроэнергии имеет основополагающее значение для обеспечения жизнедеятельности и безопасности государства. В настоящее время Казахстан столкнулся с нехваткой электроэнергии, поэтому интерес к технологиям использования возобновляемых источников энергии неуклонно растет.

Ветер – это горизонтальное перемещение (поток воздуха параллельно земной поверхности), возникающее в результате неравномерного распределения тепла и атмосферного давления и направленное из зоны высокого давления в зону низкого давления.

Разница в нагреве поверхности земли формирует атмосферное движение и кинетическую энергию ветра. Ветер имеет три важных аспекта: скорость (скорость), плотность вовлеченного газа и энергоёмкость (энергия).

Кинетическую энергию ветра, возможно преобразовать в электрическую энергию с помощью электроветрогенератора [1].

Энергетический потенциал ветра – это доступная мощность кинетической энергии. Такие факторы, как ориентация поверхности, уклон, скорость отражения, поглощения и передачи, влияют на ресурсы ветровой энергии. Дополнительными факторами, влияющими на ресурсы энергии ветра, являются здания, водоемы и растительность, приводящие к изменению скорости ветра и ее распределению по диапазонам.

Материалы и методы

Основным показателем, определяющим количество ветровой энергии, которое возможно преобразовать в электрическую с помощью ветроэнергетической установки (ВЭУ), является скорость ветра. Максимальную мощность, получаемую из ветра, с учетом закона Бетца-Жуковского (1), который показывает, что максимальная эффективность извлечения энергии составляет 59,3%, можно рассчитать по выражению [2]:

$$P_{\text{в}} = \frac{rSV^3}{2\lambda} \eta, \text{Вт}, \quad (1)$$

где r – плотность воздуха, кг/м³;
 S – ометаемая площадь, м²;
 V – скорость ветра, м/с;
 η – КПД ветрогенератора.

Как видим, энергия ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра. Так, например, при удвоении скорости ветра, получаемая ВЭУ кинетическая энергия возрастает в восемь раз, чем электрическая энергия, что соответственно вызывает увеличение количества вырабатываемой ВЭУ электроэнергии.

С целью определения ветрового потенциала на примере Карагандинской области был проведен анализ средней скорости ветра за период с 01.01.2018 по 31.12.2022 годы [3].

На рисунке 1 показаны годовые значения среднемесячной скорости ветра за рассматриваемый период.

На рисунке 2 приведена гистограмма средних значений скорости ветра в зависимости от месяца года за рассматриваемый период. Исходя из анализа представленных данных, можно сделать вывод, что среднемесячная скорость ветра в зимне-весенний период увеличивается по сравнению с летне-осенним периодом.

Для ВЭУ малой мощности (до 5 кВт) значение минимальной скорости ветра, необходимой для выработки электрической энергии, составляет 2,5 м/с [3]. На рисунке 3 приведено годовое распределение количе-

ства дней со средней скоростью ветра менее 2,5 м/с за рассматриваемый период.

Результаты и обсуждение

Так как скорость ветра является случайной величиной, для определения количества энергии, которое может выработать ВЭУ, необходимо определить функцию распределения вероятности скорости ветра по диапазонам и характеристику мощности ветроустановки.

Скорость ветра для данного местоположения характеризуется несколькими функциями плотности вероятности, которую можно охарактеризовать как непрерывную случайную величину в функции плотности $f(v)$ (3) или функции распределения $F(v)$ (2) [4, 5]:

$F(v)$ – интегральная функция распределения, равная вероятности того, что скорость ветра больше значения v ;

$f(v) = dF(v)/dv$ – дифференциальная функция распределения, равная плотности вероятности, т.е. отношению вероятности нахождения скорости в интервале между v и $v + dv$ к ширине интервала dv .

Проведенный анализ показал, что для получения наиболее точных результатов распределения скоростей ветра в диапазоне 4-20 м/с используется двухпараметрическое распределение Вейбулла, либо его упрощение в виде однопараметрической функции распределения Рэлея, определяемые выра-

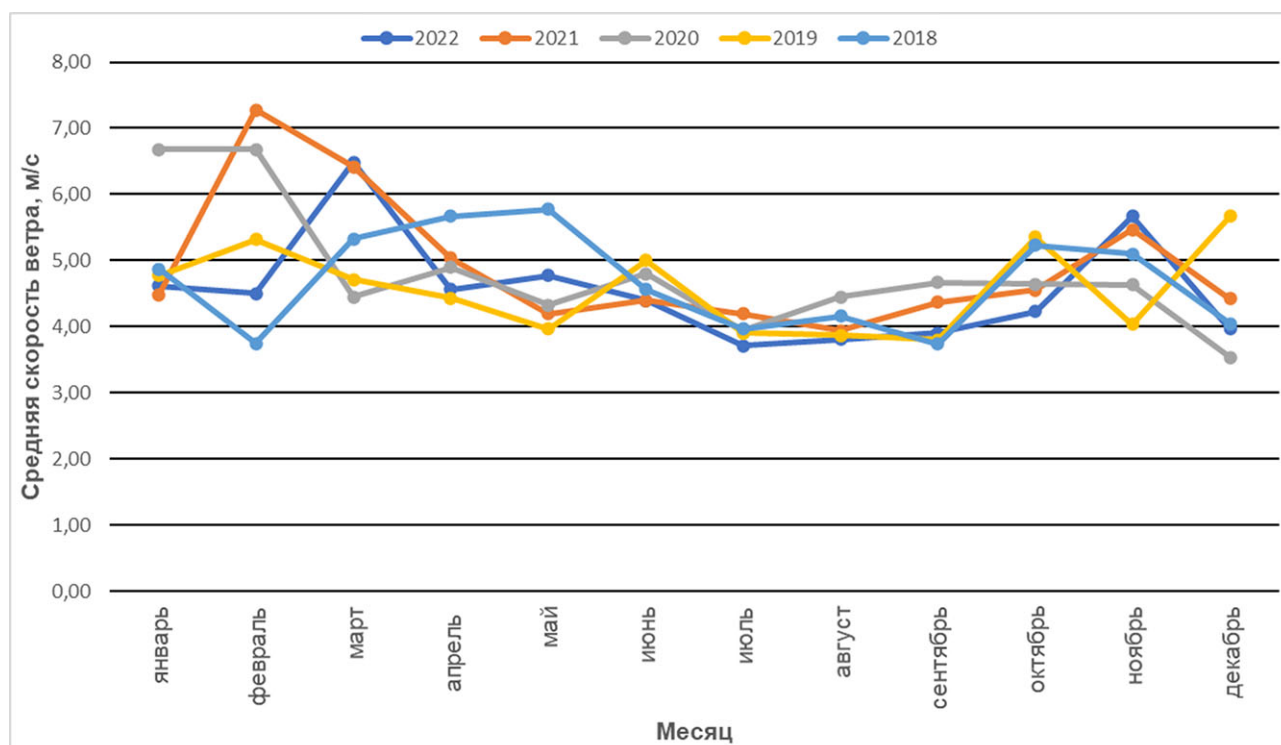


Рисунок 1 – Среднемесячные значения скорости ветра

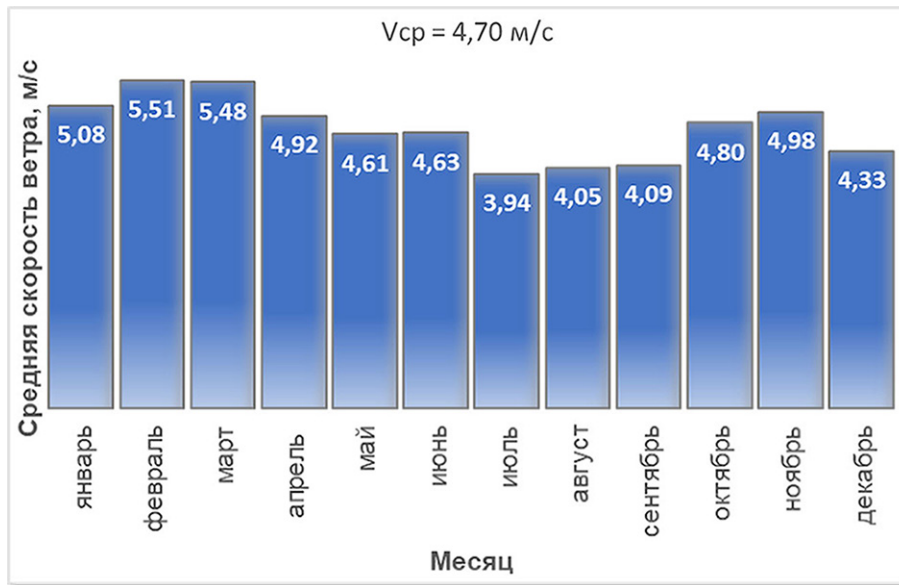


Рисунок 2 – Среднегодовые значения скорости ветра

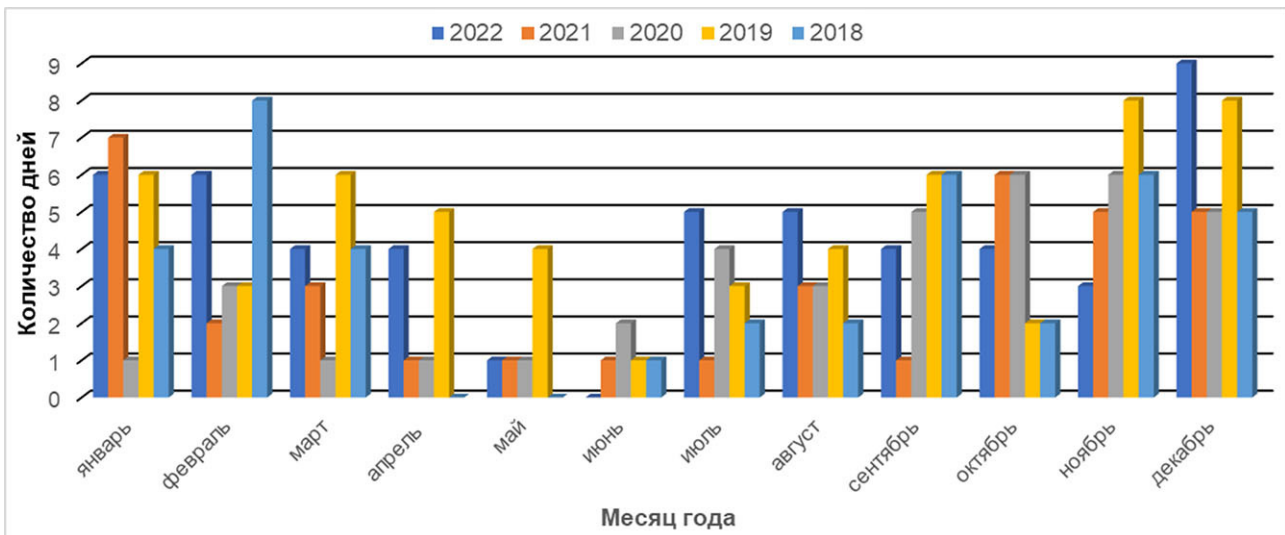


Рисунок 3 – Количество дней в году со скоростью ветра менее 2,5 м/с

жениями [6]:

$$F(v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (2)$$

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]. \quad (3)$$

Распределение вероятности Вейбулла имеет два параметра, которые необходимо определить: k , характеризующий крутизну распределения (т.е. безразмерный параметр формы), и масштабный коэффициент – c , характеризующий диапазон изменения функции распределения в зависимости от скорости ветра и имеющих аналогичные единицы измерения (м/с).

Значения параметров k и c определяются на основании имеющихся данных за период исследования. Обычно за единичный интервал принимается один месяц. Задавшись значением $k = 2$, значение параметра c определим из следующего выражения:

$$c = \frac{2v_{cp}}{\sqrt{\pi}} = \frac{2 \cdot 4,7}{\sqrt{\pi}} = 5,3 \text{ м/с,}$$

где v_{cp} – средняя скорость ветра (среднемесячная), м/с.

На рисунке 4 приведена зависимость плотности распределения вероятности (распределение Вейбулла) среднегодовой скорости ветра от диапазонов.

Мощность ветра P_0 , проходящего через поперечное сечение A со скоростью v , определим как:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho A v^3 \text{ Вт,}$$

где $\rho = 1,221$ – принятая плотность воздуха, кг/м³.

Для расчета удельной мощности ветра, приходящейся на единицу площади поперечного сечения, используем выражение:

$$P_{уд} = \frac{1}{2} \cdot \rho v^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Среднегодовая удельная энергия ветра $W_{уд}$ (энергия, протекающая за год через 1 м² поперечного сечения) зависит от распределения скоростей v_i ветра, т.е. от того, какую долю годового времени t_i дул ветер с

той или иной скоростью v_i , и определяется выражением:

$$W_{уд} = \sum_{i=1}^k P_{уд} \cdot t_i = \frac{1}{2} g N \sum_{i=1}^k t_i v_i \text{ кВт/м}^2/\text{мес,}$$

где $N = 8760$, количество часов работы ветроустановки в году;

n – количество диапазонов скоростей ветра;

t_i – временной интервал.

Как видим, ветровая удельная энергия $W_{уд}$ зависит от распределения скоростей ветра по диапазонам, показывающим, какую долю годового времени t_i ветер дул с той или иной скоростью v_i .

В таблице приведены расчетные энергетические показатели ветровой энергии за рассматриваемый период.

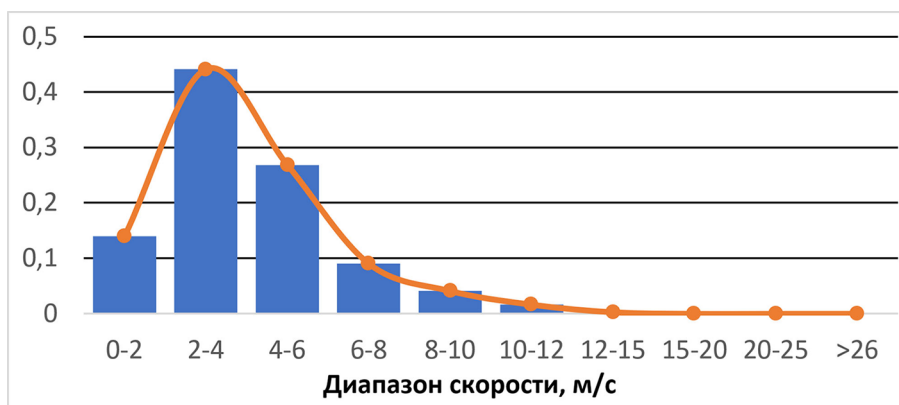


Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности среднегодовой скорости ветра

Расчетные энергетические показатели ветровой энергии

Месяц	Скорость v_i , м/с	Удельная мощность $P_{уд}$, Вт/м ²	Время t_i , час/мес	Удельная энергия $W_{уд}$, кВт/м ² /мес
январь	5,08	80,22	744	596,82
февраль	5,51	101,90	672	684,80
март	5,48	100,33	744	746,43
апрель	4,92	72,71	720	523,50
май	4,61	59,67	744	443,97
июнь	4,63	60,72	720	437,22
июль	3,94	37,40	744	278,22
август	4,05	40,41	744	300,65
сентябрь	4,09	41,87	720	301,47
октябрь	4,80	67,53	744	502,42
ноябрь	4,98	75,40	720	542,88
декабрь	4,33	49,42	744	367,66
Суммарные показатели	$v_{cp} = 4,7$	787,58	8760	5726,04

Средняя удельная мощность ветровой энергии за год составила:

$$P_{уд\ ср} = \frac{P_{уд}}{12} = \frac{787,58}{12} = 65,63 \text{ Вт/м}^2.$$

Средняя годовая удельная энергия:

$$W_{уд\ ср} = \frac{W_{уд}}{12} = \frac{5726,04}{12} = 477,17 \text{ кВт/м}^2/\text{мес}.$$

По данным таблицы получены зависимости годового распределения удельной мощности ветра от месяца года (рисунок 5) и удельной энергии в зависимости от скорости ветра (рисунок 6).

Выводы

В данном исследовании для оценки энергетических характеристик ветра использовалось распределение Вейбулла. На основании ежедневных данных определены среднемесячная и среднегодовая скорости ветра, оценены удельная мощность и энергосодержание скорости ветра с января 2018 по декабрь 2022 гг. Анализ полученных данных показал, что Карагандинская область обладает умеренным ветровым потенциалом.

Анализ данных показывает, что зависимость энергетических показателей от ско-

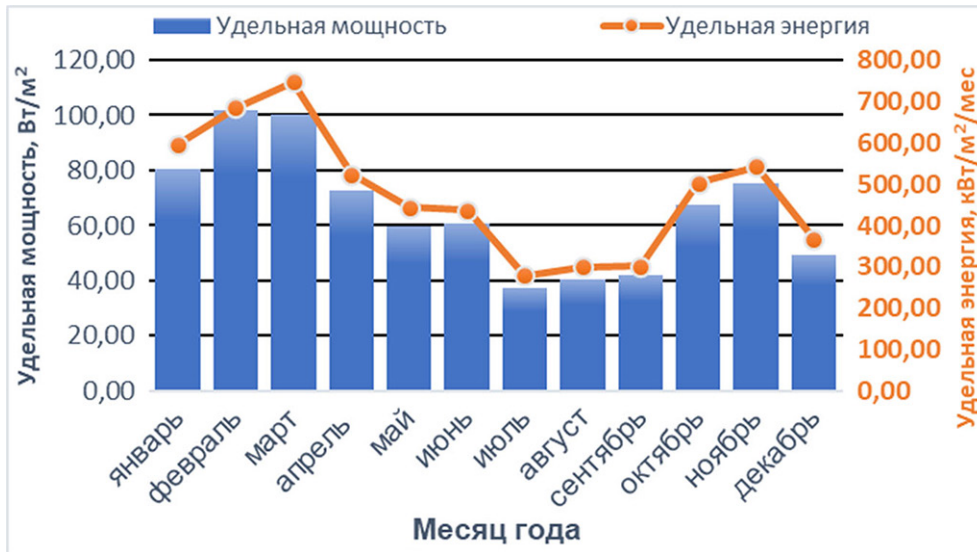


Рисунок 5 – Распределение удельных мощности и энергии ветра в зависимости от месяца года

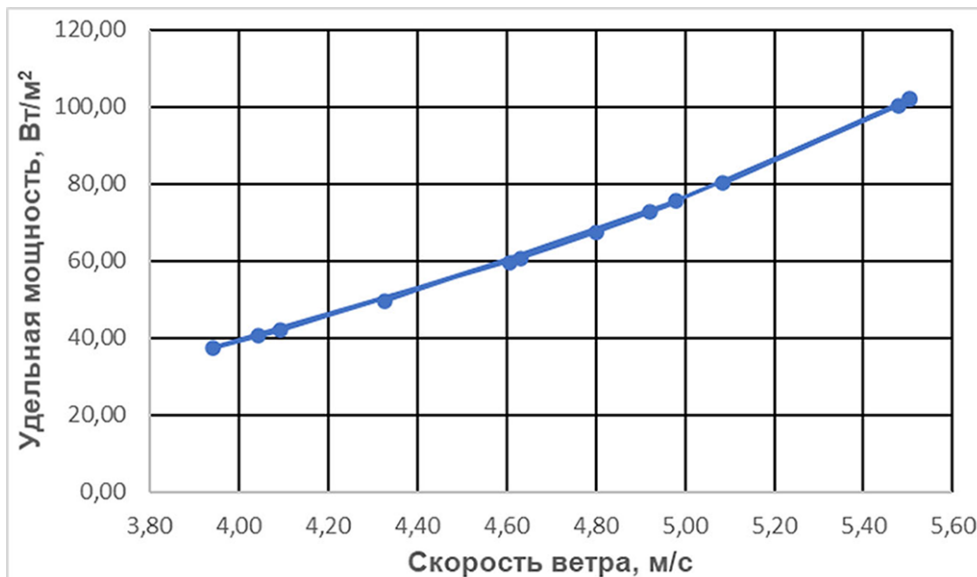


Рисунок 6 – Зависимость удельной мощности от скорости ветра

рости ветра является нелинейной. Энергию ветра можно использовать для выработки электроэнергии с учетом изменения скорости ветра в зависимости от времени суток, погоды и местоположения, что необходимо учитывать при проектировании ВЭУ. На выработку электроэнергии влияет не только средняя скорость ветра, но и распределение ее по диапазонам. Максимум показателей в рассматриваемой местности приходится на зимне-весенний период. В рассматриваемых условиях имеется достаточный ветроэнергетический потенциал, дающий возможность создания локальных источников энергии на

основе ВЭУ.

Согласно программе развития электроэнергетики, Казахстану необходимо развивать экологически чистые энергетические технологии [7]. Кроме того, развитие альтернативной энергетики в целом позволит Казахстану увеличить экономический потенциал и более полно удовлетворять спрос на потребление энергии. В связи с прерывистым характером ветра, энергию ВЭУ необходимо сочетать с другими видами энергии, и ее следует рассматривать не в виде самостоятельного, а в качестве дополнительного источника энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика. [Текст]: Справочно-методическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. – М.: ИД «Энергия», 2015. – 320 с.
2. <https://alter220.ru/veter/fizicheskie-osnovy-vetrogeneratorov.html>. 01.02.2023.
3. http://pogoda-service.ru/archive_gsod_res.php?country=KZ&station=353940&datepicker_beg=01.01.2018&datepicker_end=31.12.2022&submit=Посмотреть. 01.02.2023.
4. Безруких П.П. Ветроэнергетика. [Текст]. – М.: Энергия, 2014. – 665 с.
5. Куашнинг Фолькер. Системы возобновляемых источников энергии. Технология – Расчеты – Моделирование [Текст]: учебник / Пер. с немецкого. – Астана: Фолиант, 2013. – 432 с.
6. Янсон Р.А. Ветроустановки [Текст]: учеб. пособие. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2017. – 37 с.
7. Потенциал ветровой энергии в Казахстане. Eurasian Research Institute. <https://www.eurasian-research.org/publication/potential-of-wind-energy-in-kazakhstan/?lang=ru>. 01.02.23.

Вейбулл тарту функциясын пайдалану арқылы жел энергиясының әлеуетін бағалау

¹**ИВАНОВ Валерий Анатольевич**, PhD, аға оқытушы, V.ivanov@kstu.kz,

^{1*}**БАХЫТЖАН Ақгүл Бахытжанқызы**, докторант, ассистент, akgul.bakhytzhana@mail.ru,

¹**ДАЙЧ Леонид Израилевич**, магистр, аға оқытушы, l.daych@mail.ru,

¹**ПОТЁМКИНА Елена Борисовна**, магистр, аға оқытушы, bpelena75@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – баламалы энергия көзі ретінде жел энергиясының әлеуетін бағалау. Жел энергетикасының энергетикалық әлеуеті мысалы Қарағанды облысы бойынша 2018 жылғы қаңтардан 2022 жылғы желтоқсанға дейінгі кезеңге есептелді. Вейбулл дистрибуциясы арқылы жел энергиясының көрсеткіштеріне бағалау жүргізілді. Алынған көрсеткіштерге сүйене отырып, жел энергетикасының энергетикалық әлеуетін қарастырылып отырған орын үшін қуатты аз қуатты түрлендіру жүйесі үшін қолайлы деп санауға болады. Жел генераторы күннің уақытына, жел бағытына, ауа райы жағдайларына және орналасқан жеріне байланысты жел жиілігінің таралуына сәйкес болуы керек. Желдің мезгілдік сипатына байланысты жел энергиясын дербес емес, қосымша энергия көзі ретінде қарастыру керек.

Кілт сөздер: желдің энергетикалық сипаттамалары, жел жылдамдығы, меншікті қуат, Вейбулл таралулары, баламалы энергия көздері, энергия қарқындылығы.

Assessment of Wind Energy Potential Using the Weibull Distribution Function

¹**IVANOV Valery**, PhD, Senior Lecturer, V.ivanov@kstu.kz,

¹***BAKHYZZHAN Akgul**, Doctoral Student, Assistant, akgul.bakhytzhhan@mail.ru,

¹**DAICH Leonid**, Master's Degree, Senior Lecturer, l.daych@mail.ru,

¹**POTEMKINA Elena**, Master's Degree, Senior Lecturer, bpelena75@mail.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of this study is to assess the potential of wind energy as an alternative energy source. The energy potential of wind energy was calculated using the example of the Karaganda region for the period from January 2018 to December 2022. An assessment of wind energy indicators was carried out using the Weibull distribution. Based on the obtained indicators, the energy potential of wind energy can be considered suitable for a low-power power conversion system for the location in question. The wind generator must be designed to match the wind frequency distribution depending on the time of day, wind direction, weather conditions and location. Due to the intermittent nature of wind, wind energy should be considered not as an independent, but as an additional source of energy.

Keywords: energy characteristics of wind, wind speed, specific power, Weibull distributions, alternative energy sources, energy intensity.

REFERENCES

1. Bezrukikh P.P., Bezrukikh P.P. (Jr.), Gribkov S.V. *Vetroenergetika*. [Text]: Reference and methodological guide / Chif editor P.P. Bezrukikh. – Moscow: Publishing Haus «Energy», 2015. – 320 p.
2. <https://alter220.ru/veter/fizicheskie-osnovy-vetrogeneratorov.html>. 01.02.2023.
3. http://pogoda-service.ru/archive_gsod_res.php?country=KZ&station=353940&datepicker_beg=01.01.2018&datepicker_end=31.12.2022&bsubmit=looknig. 01.02.2023.
4. Bezrukikh P.P. *Vetroenergetika*. [Text]. – Moscow: Energy, 2014. – 665 p.
5. Ruashning Folker. *Renewable energy systems. Technology – Calculations – Simulation* [Text]: Textbook/ Transl. from German. – Astana: Foliant, 2013. – 432 p.
6. Janson R. A. *Wind plants* [Text]: textbook. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017. – 37 p.
7. *Wind energy potential in Kazakhstan*. Eurasian Research Institute. <https://www.eurasian-research.org/publication/potential-of-wind-energy-in-kazakhstan/?lang=ru>. 01.02.23.