



## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В КАШКАДАРЬИНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Б. Сафаров<sup>1\*</sup>, Г.Н. Узаков<sup>2</sup>, Р.А. Мамедов<sup>1</sup>, Х.А. Давлонов<sup>2</sup>, С.Э. Бекназаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Бухарский инженерно-технологический институт, Узбекистан, 200100, Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: +998(90) 299-41-24

<sup>2</sup>Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан, 180100, Карши, ул. Мустакиллик, 225. Тел.: +998(90) 876-05-45

\*e-mail: [a-safarov91@mail.ru](mailto:a-safarov91@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований оценки ресурсов ветроэнергетического потенциала Кашкадарьинской области и выявлению местностей с высоким потенциалом энергии ветра. При оценки ресурсов валового (теоретического) и технического ветроэнергетического потенциала региона использовалась двухпараметрическая функция распределения вероятностей Вейбулла. Данные о средней скорости ветра были получены из географической информационной системы NASA POWER. Определены показатели экономической эффективности строительства ветроэлектростанции мощностью 500 МВт в регионах с высоким потенциалом использования энергии ветра. Результаты, полученные на основе данного научного исследования, могут быть использованы местными и иностранными инвесторами, докторантами, занимающимися научными исследованиями, и инженерами данной сферы.

**Ключевые слова:** скорость ветра, геоинформационная система, функция распределения вероятностей Вейбулла, параметры формы и масштаба, удельная мощность, удельная энергия, валовой (теоретический) и технический потенциал, технико-экономический анализ.

**Abstract.** The article presents the results of research on assessing the resources of the wind energy potential of the Kashkadarya region and identifying areas with high wind energy potential. When assessing the resources of the gross (theoretical) and technical wind energy potential of the region, a two-parameter Weibull probability distribution function was used. The average wind speed data was obtained from the NASA POWER geographic information system. The indicators of economic efficiency of the construction of a wind power plant with a capacity of 500 MW in regions with a high potential for the use of wind energy have been determined. The results obtained on the basis of this scientific research can be used by local and foreign investors, doctoral students engaged in scientific research, and engineers in this field.

**Key words:** wind speed, geographic information system (GIS), Weibull probability distribution function, shape and scale parameters, specific power, specific energy, gross (theoretical) and technical potential, techno-economic analysis.

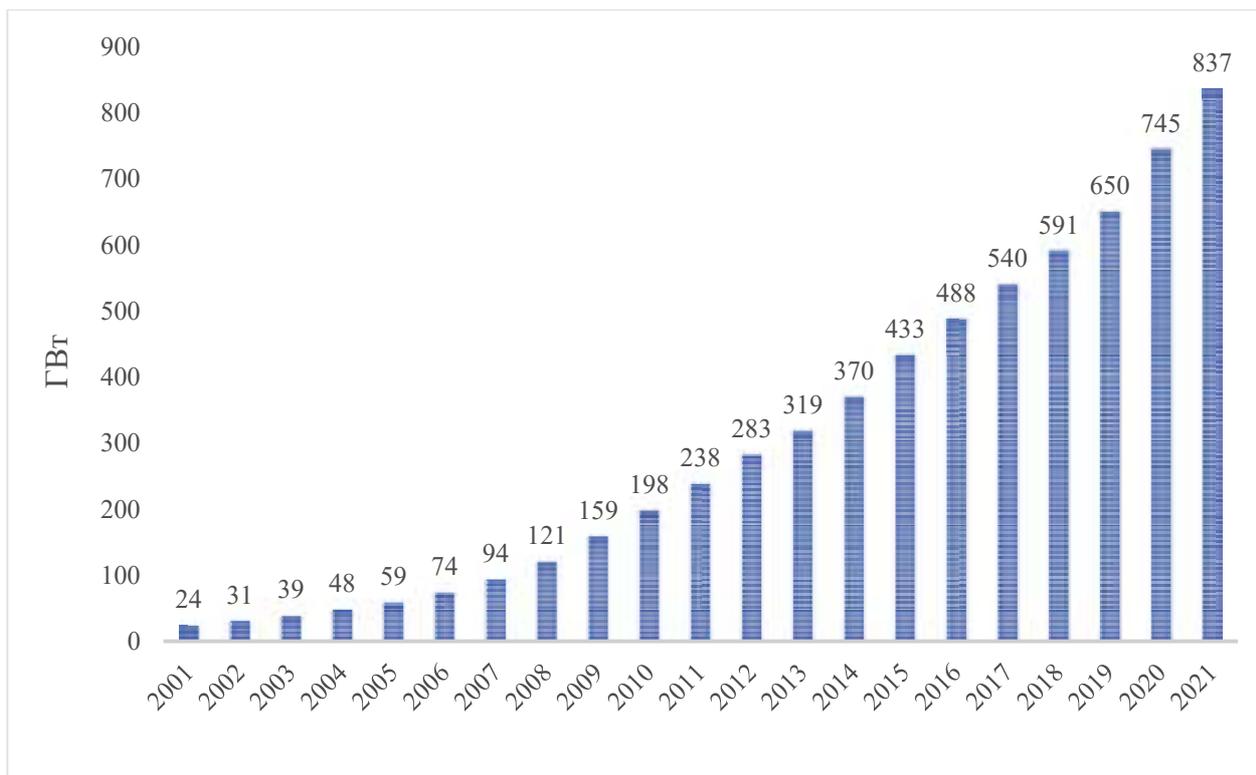
### Введение.

Увеличение использования возобновляемых источников энергии в мировой энергетической системе играет важную роль в стабилизации вопросов, связанных с энергетической безопасностью, экологией и охраной окружающей среды, экономией топливно-энергетических ресурсов. Использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая, биомасса, геотермальная и гидроэнергия, быстро развивается. Благодаря низкой стоимости электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников энергии, и тому, что она практически безвредна для окружающей среды, такие проекты реализуются все чаще, с большими инвестициями в них, перспективными разработками и исследованиями.





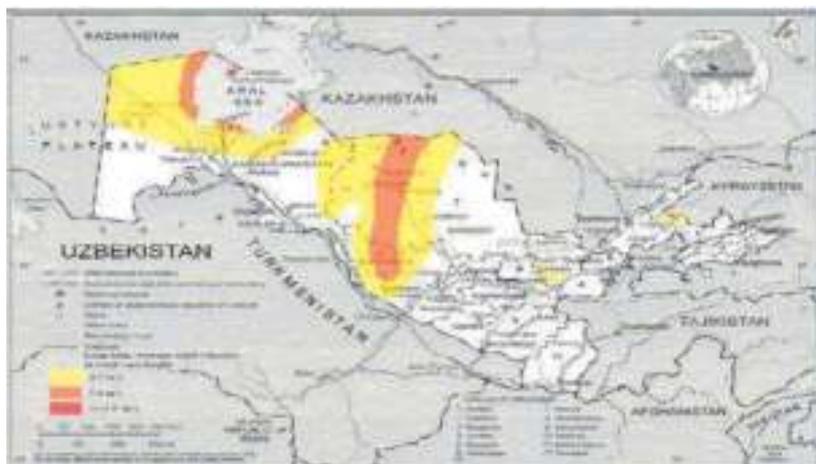
На сегодняшний день использование энергии ветра является одним из наиболее перспективных проектов среди возобновляемых источников энергии. Циркуляция воздушных масс вокруг атмосферы Земли оценивается специалистами по-разному. Годовой теоретический запас энергии ветра в 100 раз превышает все запасы энергии на Земле и составляет  $330 \cdot 10^{12}$  кВт·ч. Однако, только 10-12% этой энергии может быть использовано [1]. Сегодня более 100 стран мира используют энергию ветра для обеспечения населения и промышленных предприятий надежным и экологически чистым источником энергии. На рис. 1 представлены показатели установленной мощности ветровых электростанций мира по годам [2]. Китай является мировым лидером в области ветроэнергетики. В 2021 году на долю выработки электроэнергии из потоков ветра на Китай пришлось 50,9% электроэнергии, выработанной ветроэлектростанциями во всем мире [3].



**Рис.1. Установленная мощность ветровых электростанций в мире по годам.**

В Узбекистане проводятся научно-исследовательские работы по оценке ресурсов ветроэнергетического потенциала и их использованию. До недавнего времени ресурсы валового (теоретический) ветроэнергетического потенциала нашей республики были оценены в 2,2 млн. т.у.т.

Однако потенциал ветроэнергетики в локальных, отдельных районах (Навои, Устюрт, Бухара, Бекобад, Мубарек) не был полностью учтен. Кроме того, этот показатель рассчитывался с помощью актинометрических станций, расположенных вдали друг от друга на высоте 5-8 метров (фактически его следует определять на высоте 25-100 метров). В 2015 году в сотрудничестве с немецкими компаниями «Intec-Copa, GEONET» и АО «Узбекэнерго» проведены исследования по оценке ресурсов ветроэнергетического потенциала на территории Узбекистана и созданию карты ветроэнергетики (Рис. 2) [4]. Данное исследование было направлено на определение ресурсов ветроэнергетического потенциала в шести регионах нашей республики и оценку возможностей их использования.



**Рис.2.** Карта ресурсов ветроэнергетического потенциала Узбекистана.

Немецкие специалисты разработали атлас ветров нашего региона при помощи 3d моделирования. В качестве перспективных регионов для установки ветротурбин большой мощности определены Навоийская, Бухарская, Ташкентская, Кашкадарьинская, Самаркандская и Каракалпакстанская области. По результатам проведенных исследований общий ветроэнергетический потенциал нашей республики на высоте 80 м был оценен в 520 ГВт.

В Республике Узбекистан У.А. Таджиев и др., своё научное исследование посвятили вопросам появления потоков ветра их характеристики, географические параметры региона и влияние синоптических процессов, происходящих в атмосфере, на ветровой поток на территории нашей республики. Кроме того, были определены и проанализированы значения средней скорости ветра и относительных мощностей всех районов нашей республики на высоте 10-80 м [5].

Р.А. Захидов и др., используя данные о скорости ветра, полученные с 88 метеостанций, расположенных в регионах нашей республики, оценили показатели годового производства электроэнергии, вырабатываемой горизонтальными ветроэнергетическими установками мощностью 10, 30, 60, 100, 250, 500 кВт [6]. Специалисты и ученые оценили ресурсы потенциала энергии ветра на разных высотах Навоинской и Каракалпакских областей, расположенные в низменных районах Узбекистана. Данные о скорости ветра были собраны и проанализированы с метеостанций МС Тамди и МС Жаслик, расположенных в этих районах. Техничко-экономические показатели ветроэнергетических установок большой, средней и малой мощности основаны на условиях воздействия приземных слоев атмосферы Навоийской и Каракалпакской областей [7].

13 июня 2018 г. был запущен новый веб-портал данных NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources с большим потенциалом для облегчения доступа к параметрам солнечной радиации и метеорологическим данным во всем мире. Новый портал данных POWER позволяет получать доступ, загружать и использовать данные во многих форматах. Ежедневные данные о скорости ветра получают со спутника MERRA-2, а анализы выполняются на  $1/2^\circ$  широты и  $1/2^\circ$  долготы на высоте 2, 10 и 50 м над местной поверхностью. База данных NASA содержит самые разнообразные метеорологические данные для любой точки Земли [8]. В последние годы успешно применяются Global Wind Atlas — это веб-приложение, которое помогает политикам и инвесторам определять районы с сильным ветром и выполнять первоначальные расчеты для получения энергии ветра практически из любой точки мира. Программа предоставляет свободный доступ к данным об удельной мощности и энергии ветра, повторяемости направления потока ветра (роза ветров) и скорости ветра путем моделирования свойств энергии ветра на разных высотах. Разработан Датским техническим университетом Дании в сотрудничестве со Всемирным



банком и финансируется Программой помощи в управлении энергетическим сектором (ESMAP) [9].

Известными учеными мира проведены исследования для оценки потенциала ветроэнергетических ресурсов. Ч.Н. Аун Тан в научных исследованиях использовал современные технологии геоинформационных систем для оценки ресурсного потенциала возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой и гидроэнергетики) в регионе Мьянмы. В исследовании оценивался потенциал эффективного использования возобновляемых источников энергии для сельскохозяйственных потребителей энергии в регионе Майанма [10]. А.Б. Рыхлов использовал технологии геоинформационных систем и методы статистического анализа для оценки потенциала ветроэнергетических ресурсов на разных высотах юго-восточных регионов России. В данном исследовании была разработана новая методика климатической оценки характеристик скорости ветра на разных высотах, которая обеспечила точную оценку ветроэнергетического потенциала и анализ возможностей использования источников энергии ветра [11].

В исследовании Д. Ментиса проанализировано потенциальное использование энергии ветра для предотвращения текущего дефицита электроэнергии на африканском континенте. В исследовании оценивается валовой (теоретический) и технический потенциал ветроэнергетики в континентальных районах Африки на основе современных технологий. База данных NASA POWER и статистический анализ данных о скорости ветра использовались для картографирования размещения современных ветроустановок в регионах Африканского континента, для изучения годовой электроэнергии, вырабатываемой ветроустановками [12]. В исследовании Б. Кылыча использовались данные о средней скорости ветра в период с 2009 по 2016 год, полученные с четырех метеорологических станций в регионе, для анализа ветроэнергетического потенциала турецкой провинции Бурдур. Данные метеостанций в провинции Бурдур изучались с использованием методологии искусственной нейронной сети и оценочных прогнозов скорости ветра к концу 2030 г [13]. В исследовании А. Аллоуи использовались различные методы распределения для оценки потенциала ресурсов энергии ветра в городах Аль-Хосейма, Тетуан, Ассила, Эссуира, Эль-Аюн и Дахла, расположенных в шести прибрежных районах Королевства Марокко. Анализ показал, что использование двухпараметрической функции распределения Вейбулла при оценке потенциала ветроэнергетических ресурсов является более точным, чем другие виды функций распределения [14]. С.А. В исследовании под руководством Ахмеда был проведен статистический анализ удельной плотности энергии ветра в регионе Панджвен (Пакистан) в период с января 2001 г. по декабрь 2003 г. на основе среднемесячных скоростей ветра. Годовая, месячная максимальная, средняя, минимальная скорости ветра и удельные плотности энергии ветра региона рассчитывались с использованием функций распределения Вейбулла и Релея [15]. В исследовании под руководством К. Озая потенциал ветровой энергии региона Алкати в Измире оценивался с использованием двухпараметрической функции распределения Вейбула. При статическом анализе ветроэнергетического потенциала статически анализировались данные, полученные с метеорологических станций, расположенных в районе Алкати на трех различных высотах 30, 50 и 70 м, с интервалом 10 минут в течение пяти с половиной лет. В результате проведенного исследования были рассчитаны распределение скорости ветра, повторяемость направления ветра (средняя скорость ветра), средняя скорость ветра, параметры формы и масштаба (к, с) по параметрам Вейбулла для региона [16].

На основе анализа научных исследований, определение ветроэнергетического ресурсного потенциала заданного региона с использованием двухпараметрической функции распределения вероятностей Вейбула основан на том, что она более надежна, чем другие виды функций распределения. Кроме того, необходимо определить территорию установки ветровой электростанции в регионе с высокой возможностью энергии ветра.

**Методы и материалы.**

При оценке характеристик скорости ветра используют плотность распределения Вейбулла (равную плотности вероятности, т. е. дифференциал распределения, равный отношению скорости скорости в диапазоне  $v$  и  $v + dv$  к интервалу  $dv$ ) должны быть определены функции интеграла распределения (скорость ветра выше  $v$ ) функции интеграла распределения распределения). Эти математические выражения определяются следующим образом [17,18]:

$$f(\bar{v}) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^k} \quad 0 \leq \bar{v} \leq \infty \quad (1)$$

$$F(\bar{v}) = \int_0^{\infty} f(\bar{v}) d\bar{v} = 1 - e^{-\left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^k} \quad 1 \leq k \leq 10 \quad (2)$$

где  $k$  - параметр формы (в зависимости от расположения региона);  $c$  - параметр, определяющий масштаб распределения функции (параметр, зависящий от средней скорости ветра, м/с).

Для анализа данных о скорости ветра нам необходимо определить параметры такие как, параметр формы и масштаба распределения вероятностей Вейбулла. Параметры формы и масштаба определяются следующими выражениями [19,20]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (3)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

где  $\sigma$  - стандартное отклонение м/с,  $\Gamma$  - гамма-функция (выбирается из таблицы) [21].

Стандартное отклонение используется для характеристики рассеивания наблюдаемых значений выборки вокруг ее среднего значения. Выражение стандартного отклонения определяется следующим соотношением [22]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(v_1 - \bar{v})^2 + (v_2 - \bar{v})^2 + \dots + (v_i - \bar{v})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (5)$$

По параметрам, определенным из функции распределения вероятностей Вейбулла, мы можем определить удельные значения мощности и энергии, полученные от ветрового потока данного региона. Эти параметры определяются следующими математическими выражениями [23,24]:

$$P_B = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (6)$$

$$E_B = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \cdot T \quad (7)$$

где  $P_B$  - удельная мощность, определяемая по функции распределения вероятностей Вейбулла, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_B$  - удельная энергия, определяемая по функции распределения вероятностей Вейбулла, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $T$  - продолжительность времени, часов;  $\rho$  - плотность воздушного потока (на высоте 10 м плотность воздушного потока составляет 1,25 кг/м<sup>3</sup>).

Изменение плотности воздушного потока по высоте определяется следующим упрощенным выражением [25]:

$$\rho_{H2} = \rho_{H1} - (1,194 \cdot 10^{-4} \cdot H) \quad (8)$$

где  $\rho_{H1}$  - плотность воздушного потока при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  - высота, на которой измеряется скорость ветра, м.





Значения скорости ветра зависят от высоты, и с увеличением высоты пропорционально увеличивается скорость ветра. Следующая формула выражает зависимость скорости ветра от высоты [26,27]:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^\alpha \quad (9)$$

где  $v_2$  - скорость ветра, измеренная на определенной высоте, м/с;  $v_1$  - скорость ветра, измеренная на начальной высоте, м/с;  $H_1$  - начальная высота, м;  $H_2$  - выбранная высота, м;  $\alpha$  - показатель сдвига ветра.

Индекс сдвига ветра определяется по следующей формуле [28]:

$$\alpha = [0,096 \log_{10}(Z_0) + 0,016 (\log_{10}(Z_0))^2 + 0,24] \quad (10)$$

$Z_0$  - длина шероховатости поверхности на разных поверхностях земли. На пастбищных и степных участках данный параметр составляет  $Z_0 = 0,01$  м [29].

На определенной высоте также меняются значения параметров формы и масштаба. Определение этих параметров производится следующими выражениями [30]:

$$k_{H2} = \frac{k_{H1}}{1 - 0,0881 \ln\left(\frac{H_2}{H_1}\right)} \quad (11)$$

$$c_{H2} = c_{H1} \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^n \quad (12)$$

$$n = [0,37 - 0,0881 \ln(c_{H1})] \quad (13)$$

где  $k_{H1}$  - параметр формы, определяемый на высоте 10 м;  $c_{H1}$  - параметр масштаба, определяемый на высоте 10 м, м/с;  $H_1$  - начальная высота (10 м);  $H_2$  - выбранная высота, м;  $n$  - коэффициент, определяющий параметр масштаба на выбранной высоте.

Удельные значения мощности и энергии ветрового потока на разных высотах определяются значениями параметров формы и масштаба, заданными в функциях распределения вероятностей Вейбулла. Эти зависимости выражаются в следующих выражениях [31]:

$$P_{В.Н2} = \frac{1}{2} \rho_{H2} c_{H2}^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k_{H2}}\right) \quad (14)$$

$$E_{В.Н2} = \frac{1}{2} \rho_{H2} c_{H2}^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k_{H2}}\right) \cdot T \quad (15)$$

где  $P_{В.Н2}$  - удельная мощность, определяемая по функции распределения вероятностей Вейбулла на выбранной высоте, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{В.Н2}$  - удельная функция энергия, определяемая по функции распределения вероятностей Вейбулла на выбранной высоте, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $\rho_{H2}$  - плотность воздушного потока на выбранной высоте, кг/м<sup>3</sup>.

При оценке валового (теоретического) потенциала региона используем следующую формулу [32]:

$$E_{Вал.} = E_{В.Н2} \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho T S \sum_{i=1}^n V_i^3 t_i \quad (16)$$

где  $E_{В.Н2}$  - удельная энергия ветра (распределение Вейбулла), кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $T$  - время работы выбранной турбины в год, часов;  $S$  - площадь местности, км<sup>2</sup>;  $V_i$  - среднегодовая скорость ветра, м/с;  $t_i$  - вероятность нахождения скорости на определенном интервале, час.

Определим оценку технического потенциала ветроэнергетических ресурсов следующим выражением [33]:

$$E_T = \frac{N \cdot T \cdot k \cdot S}{100 \cdot D^2} \quad (17)$$

где  $N$  - номинальная мощность ветродвигателя, кВт;  $k$  - коэффициент использования установленной мощности ветроустановок;  $D$  - диаметр ветродвигателя, м.





Точно оценив потенциал ветроэнергетических ресурсов, можно определить, какие типы ветроэнергетических установок имеют наибольший потенциал для использования в данном регионе.

**Анализ экономической целесообразности.** В мире в настоящее время при оценке экономической эффективности ветроэнергетических установок широкое применение получил метод «чистой приведенной стоимости». Данный показатель представляет разность между затратами и будущей прибылью, приведенные к текущему моменту времени.

Показатель чистый дисконтированный доход (NPV) представляет величину денежных средств, которую вкладчик ожидает получить от проекта после того, как денежная прибыль окупит его первоначальный вклад и периодические денежные затраты, связанные с осуществлением проекта. Он определяется следующим выражением [34]:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{P_t - A_t}{(1+E)^t} - I_0 \quad (18)$$

где  $P_t$  – общая прибыль за год, млн.сум;  $A_t$  – расходы за год, млн. сум;  $E$  – ставка дисконтирования (постоянная ставка дисконтирования при обычных неизменных условиях составляет 15%);  $I_0$  – первоначальные инвестиции млн.сум;  $t$  – продолжительность проекта, час.

Метод внутренней нормы доходности (IRR) – норма прибыли, дисконтированной стоимости притока денежных средств равной ставке дисконтированного оттока денежных средств, или же или приведенная стоимость чистой выручки от проекта к приведенной стоимости инвестиций, а чистая приведенная стоимость – это ставка дисконтирования равная нулю. Для определения внутренней нормы доходности используется следующее выражение [35]:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{P_t - A_t}{(1+E)^t} - I_0 = 0 \quad (19)$$

Индекс прибыли (PI) представляет собой отношение валовой дисконтированной прибыли к общим дисконтированным капитальным затратам, т. е. во сколько раз полученный результат превысил первоначальные инвестиции. Эта зависимость определяется следующим выражением [36]:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{P_t - A_t}{(1+E)^t} / I_0 \quad (21)$$

Срок окупаемости (PP) – это количество лет, в течение которых капитальные затраты на проект полностью окупаются за счет прибыли. Время динамического и статического охвата отличаются. Статический срок окупаемости относится к периоду окупаемости первоначальных капитальных затрат инвестора и определяется следующим образом [37]:

$$T_{ст} = \frac{I_0}{P_t - A_t} \quad (22)$$

Динамический срок окупаемости (DPP) – это время, когда инвестор полностью окупает понесенные затраты и получает стандартный доход. Это значение определяется следующим выражением [38]:

$$T_d = \sum_{t=1}^n \frac{P_t - A_t}{(1+E_n)^t} \geq I_0 \quad (23)$$

Таким образом, метод расчета срока окупаемости инвестиций описывает полный срок окупаемости при текущей (реальной) стоимости вложенных инвестиций и в этом отношении предпочтительнее срока окупаемости инвестиций.

#### Результаты и обсуждение.

В таблице 1 приведены сведения о географическом положении и площади районов, расположенных в Кашкадарьинской области.





Таблица 1

## Сведения о географическом положении и площади районов

| №   | Районы Кашкадарьинской области | Площадь поверхность  | Широта       | Долгота      |
|-----|--------------------------------|----------------------|--------------|--------------|
| 1.  | Чиракчинский район             | 2800 км <sup>2</sup> | 39°1'59"N    | 66°34'36"E   |
| 2.  | Дехканабадский район           | 4000 км <sup>2</sup> | 38°20'23.3"N | 66°33'44.3"E |
| 3.  | Гузарский район                | 2620 км <sup>2</sup> | 38°35'0"N    | 66°5'0"E     |
| 4.  | Касбинский район               | 650 км <sup>2</sup>  | 38°57'33"N   | 65°25'41"E   |
| 5.  | Китабский район                | 1750 км <sup>2</sup> | 39°7'12.0"N  | 66°52'58.8"E |
| 6.  | Касанский район                | 1880 км <sup>2</sup> | 39°2'13"N    | 65°34'23"E   |
| 7.  | Миришкорский район             | 3100 км <sup>2</sup> | 38°54'7"N    | 65°0'3"E     |
| 8.  | Мубарекский район              | 3070 км <sup>2</sup> | 39°15'30"N   | 65°11'27"E   |
| 9.  | Нишанский район                | 2100 км <sup>2</sup> | 38°33'27"N   | 65°34'15"E   |
| 10. | Камашинский район              | 2660 км <sup>2</sup> | 38°47'35"N   | 66°28'29"E   |
| 11. | Каршинский район               | 900 км <sup>2</sup>  | 38°51'55"N   | 65°42'48"E   |
| 12. | Шахрисабзский район            | 1700 км <sup>2</sup> | 39°3'0"N     | 66°50'0"E    |
| 13. | Яккабагский район              | 1300 км <sup>2</sup> | 38°48'0"N    | 66°52'0"E    |

На рис. 3 представлена среднегодовая скорость ветра на высоте 10 м в районах Кашкадарьинской области. Эта информация взята из NASA POWER. Установлено, что средняя скорость ветра в разных точках района и на высоте 10 м находится в пределах 2,9-3,9 м/с. Средняя скорость ветра составила 3,73 м/с в Касби, Китабе, Касане, 3,98 м/с в Миришкоре и 3,99 м/с в Мубареке.

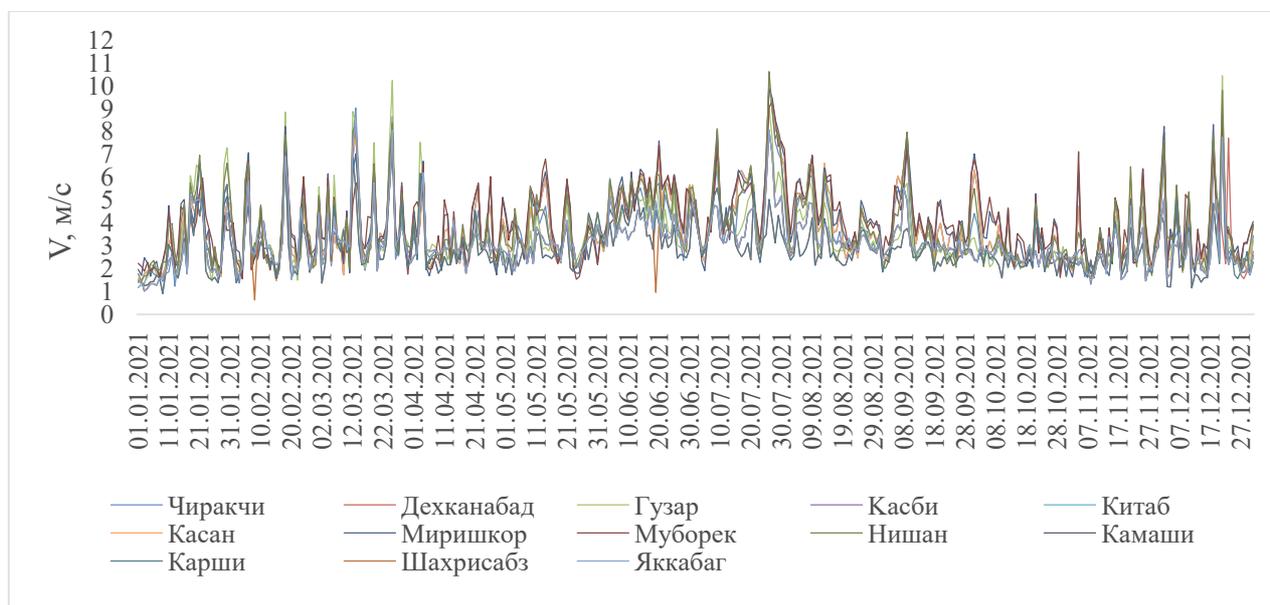
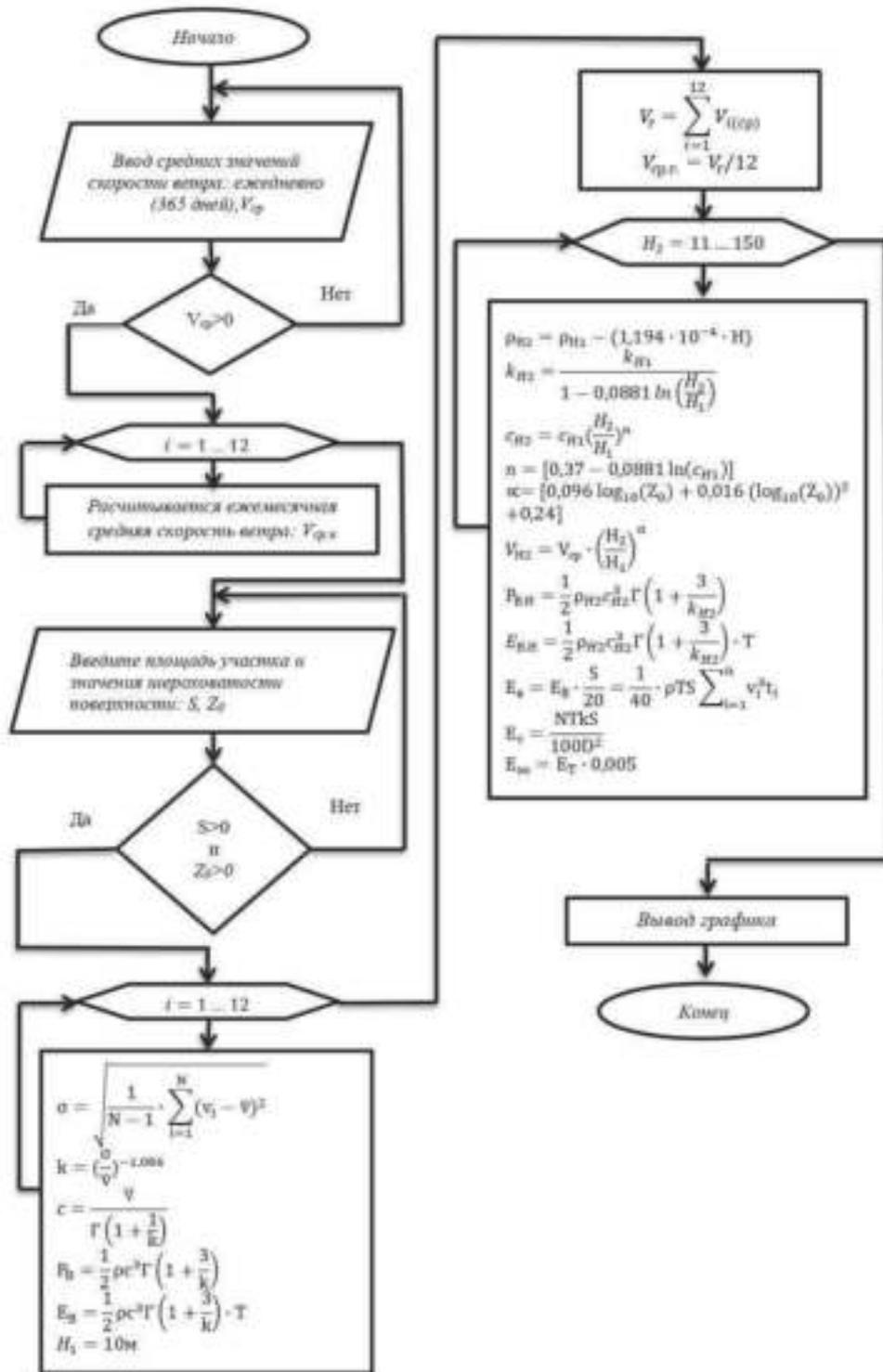


Рис.3. Данные о средней скорости ветра на высоте 10 м в Кашкадарьинской области.

На рис. 4 показан алгоритм оценки ветроэнергетического потенциала с использованием функции распределения вероятностей Вейбулла. На основе этого алгоритма можно достоверно определить среднюю скорость потока ветра на различных высотах, относительную мощность потока ветра, энергию, ресурсы валового (теоретический) и технического потенциала.



**Рис.4.** Алгоритм оценки ресурсов ветроэнергетического потенциала на различных высотах с использованием функции распределения вероятностей Вейбулла.

В таблице 2 представлены результаты статистической обработки данных о среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м по районам Кашкадарьинской области. Для статистической обработки данных использовалась функция распределения вероятностей Вейбулла. При этом можно определить стандартное отклонение (5), два параметра распределения Вейбулла формы (3) и масштаба (4), удельной мощности (6), удельной энергии (7). Было установлено, что при средней скорости ветра в районе 3,5 м/с, удельная мощность и годовая удельная энергия составили 39,68 Вт/м<sup>2</sup> и 4531,49 кВт·ч/м<sup>2</sup> соответственно.



Таблица 2

## Результаты статистической обработки данных о среднегодовой скорости ветра

| Районы                  | Средняя скорость ветра | Стандартно е отклонение | Параметры распределения Вейбулла |             |  |  |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------|--|--|
|                         |                        |                         | k, (-)                           | c, (м/с)    | Удельная мощность (Вт/м <sup>2</sup> ) | Удельная энергия (кВт·ч/м <sup>2</sup> ) |
| Чиракчи                 | 3,465                  | 1,22                    | 3,49                             | 3,85        | 40,13                                  | 352,63                                   |
| Дехканабад              | 2,902                  | 0,92                    | 4,06                             | 3,2         | 21,37                                  | 187,56                                   |
| Гузар                   | 3,460                  | 1,22                    | 3,70                             | 3,83        | 39,88                                  | 350,61                                   |
| Касби                   | 3,725                  | 1,34                    | 3,18                             | 4,15        | 49,29                                  | 433,13                                   |
| Китаб                   | 3,725                  | 1,34                    | 3,18                             | 4,15        | 49,29                                  | 433,13                                   |
| Касан                   | 3,725                  | 1,34                    | 3,18                             | 4,15        | 49,29                                  | 433,13                                   |
| Миришкор                | 3,988                  | 1,41                    | 3,24                             | 4,44        | 58,39                                  | 512,90                                   |
| Мубарек                 | 3,991                  | 1,33                    | 3,45                             | 4,43        | 56,33                                  | 494,74                                   |
| Нишан                   | 3,718                  | 1,38                    | 3,15                             | 4,14        | 49,86                                  | 438,53                                   |
| Камаша                  | 3,143                  | 0,92                    | 4,78                             | 3,45        | 26,84                                  | 235,82                                   |
| Карши                   | 2,889                  | 0,91                    | 4,06                             | 3,18        | 21,26                                  | 186,56                                   |
| Шахрисабз               | 3,126                  | 0,94                    | 4,59                             | 3,44        | 26,72                                  | 234,39                                   |
| Яккабаг                 | 3,143                  | 0,94                    | 4,61                             | 3,45        | 27,19                                  | 238,36                                   |
| <b>Средние значения</b> | <b>3,523</b>           | <b>1,17</b>             | <b>3,74</b>                      | <b>3,84</b> | <b>39,68</b>                           | <b>Σ 4531,49</b>                         |

На рис. 5 показаны средние скорости ветра по районам на разных высотах. Выражения (9) и (10) использовались для расчета значений. Согласно исследованию, рост скорости ветра зависит от , увеличения высоты и географического положения региона. Было установлено, что на высоте 10 м скорость потока ветра составила 3,99 м/с, а на высоте 100 м на высоте 10 м скорость потока ветра составила 5,5 м/с. Это в свою очередь приводит к увеличению скорости потока ветра на 40-50%.

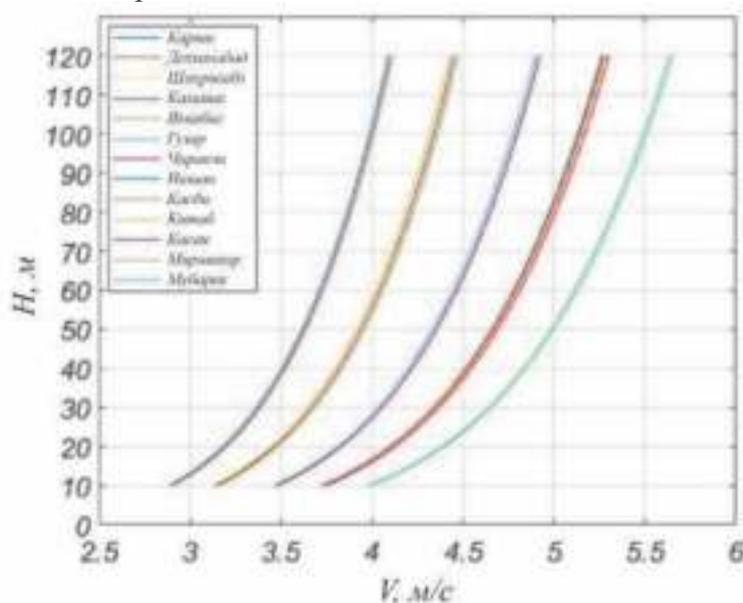
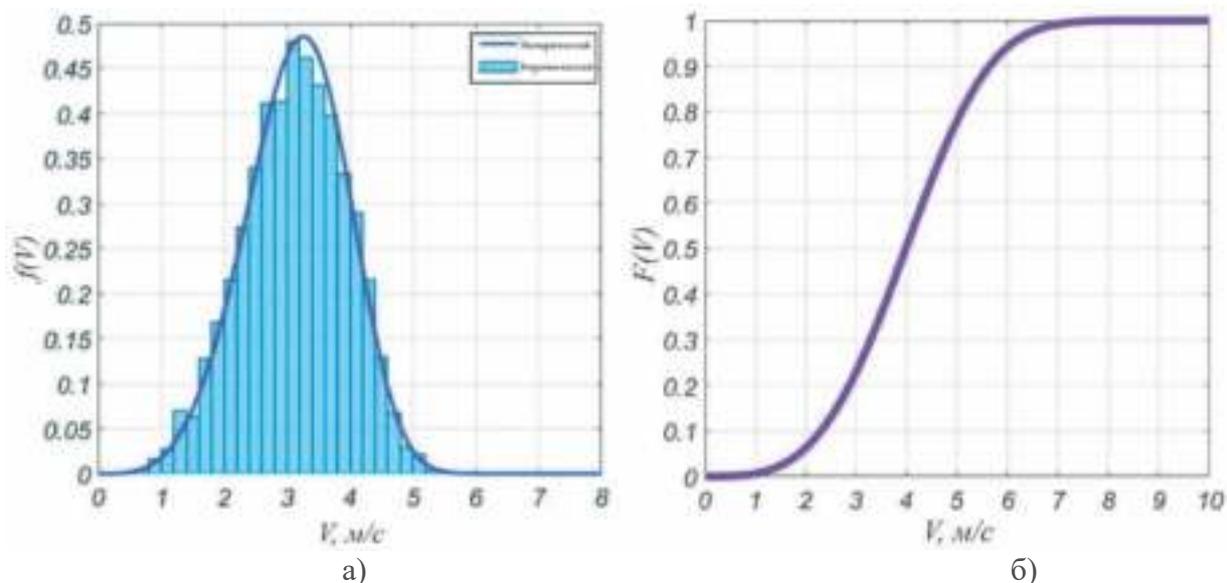


Рис. 5. Средняя скорость ветра на различных высотах Кашкадарьинского района.

На рис. 6 представлены показатели плотности (дифференциала) и интегральных функций распределения Вейбулла, полученные при оценке характеристик ветрового потока Миришкорского района, района с высокой степенью использования энергии ветра. При статистической обработке этих результатов использовались математические выражения (1) и (2).



**Рис.6. Показатели плотности (дифференциала) (а) и интегральных (б) функций распределения Вейбулла.**

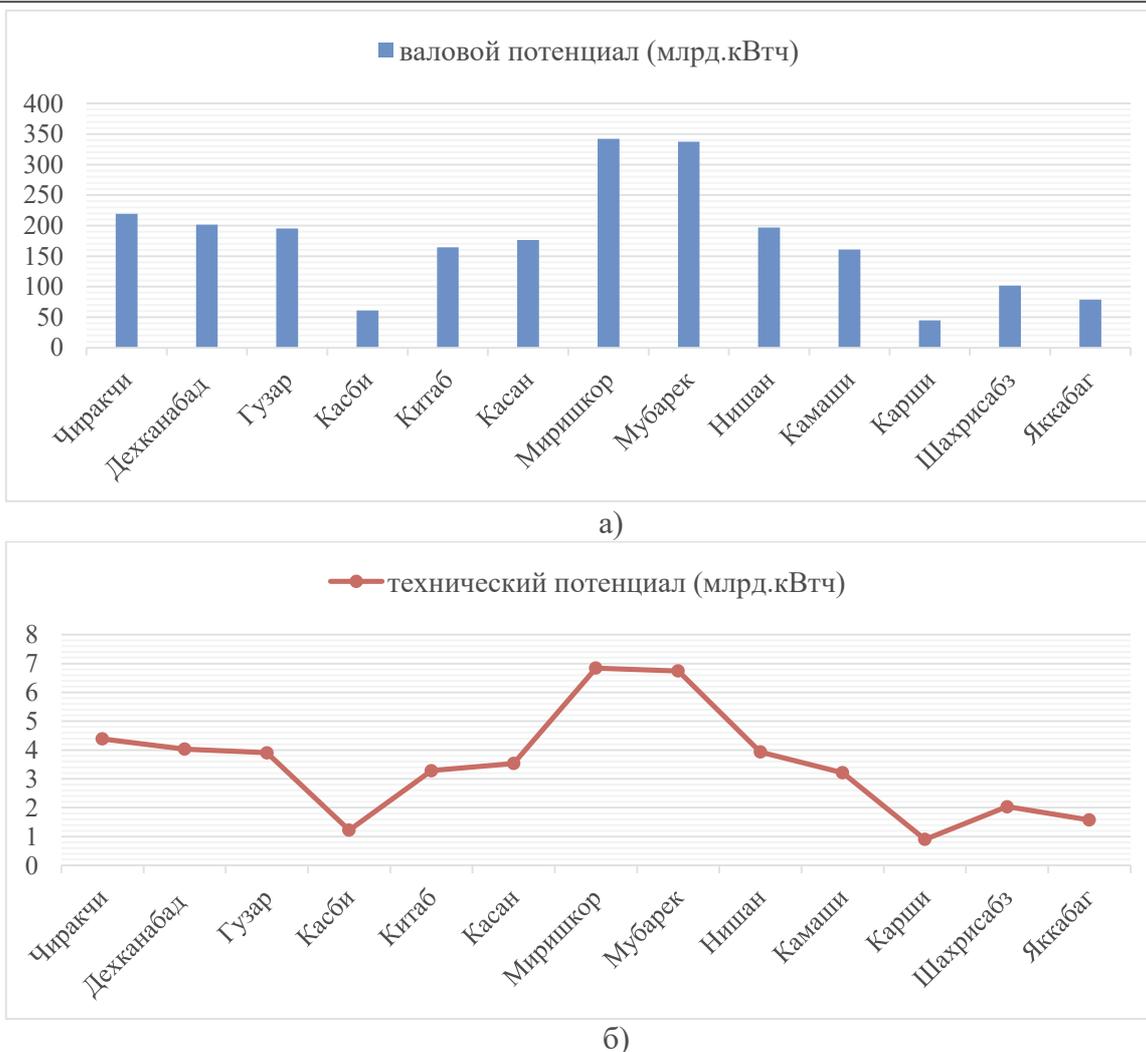
В таблице 3 приведены теоретические значения удельной мощности и энергии ветрового потока на различных высотах Кашкадарьинской области. Для определения этих показателей использовались математические выражения (14) и (15). В ходе исследования было установлено, что Миришкорский и Мубарекский районы имеют самые высокие показатели удельной мощности и энергии потока ветра.

Таблица 3

**Теоретические значения удельной мощности и энергии ветрового потока на различных высотах**

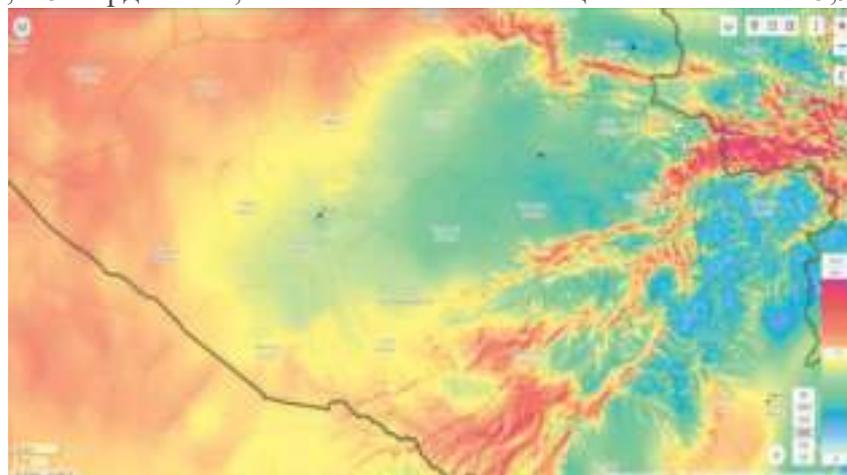
| Районы                  | Удельная мощность (Вт/м <sup>2</sup> ) |               |               | Удельная энергия (кВт·ч/м <sup>2</sup> ) |                   |                   |
|-------------------------|--|---------------|---------------|--|-------------------|-------------------|
|                         | 50 m                                   | 100 m         | 120 m         | 50 m                                     | 100 m             | 120 m             |
| Чиракчи                 | 108,94                                 | 178,90        | 204,86        | 954,33                                   | 1567,14           | 1794,57           |
| Дехканабад              | 67,04                                  | 115,11        | 132,99        | 587,28                                   | 1038,80           | 1165,01           |
| Гузар                   | 106,53                                 | 176,98        | 202,71        | 933,20                                   | 1550,38           | 1775,75           |
| Касби                   | 132,43                                 | 214,47        | 244,70        | 1160,09                                  | 1818,75           | 2143,54           |
| Китаб                   | 132,43                                 | 214,47        | 244,70        | 1160,09                                  | 1818,75           | 2143,54           |
| Касан                   | 132,43                                 | 214,47        | 244,70        | 1160,09                                  | 1818,75           | 2143,54           |
| Миришкор                | 157,58                                 | 252,06        | 286,65        | 1380,39                                  | 2208,03           | 2511,05           |
| Мубарек                 | 156,73                                 | 250,80        | 285,25        | 1372,99                                  | 2197,05           | 2498,81           |
| Нишан                   | 131,98                                 | 213,80        | 243,94        | 1156,17                                  | 1872,85           | 2136,95           |
| Камаша                  | 82,27                                  | 137,82        | 158,65        | 720,65                                   | 1207,30           | 1389,79           |
| Карши                   | 67,05                                  | 113,97        | 131,70        | 587,32                                   | 998,36            | 1153,68           |
| Шахрисабз               | 81,51                                  | 136,65        | 157,33        | 714,07                                   | 1197,05           | 1378,23           |
| Яккабаг                 | 82,61                                  | 138,36        | 159,26        | 723,68                                   | 1212,01           | 1395,10           |
| <b>Средние значения</b> | <b>110,73</b>                          | <b>181,37</b> | <b>207,49</b> | <b>∑ 12610,35</b>                        | <b>∑ 20505,22</b> | <b>∑ 23629,56</b> |

На рис. 7 представлены результаты валового (а) и технического (б) потенциала ветроэнергетических ресурсов Кашкадарьинской области. Математические выражения (16) и (17) использовались при теоретическом расчете этих результатов. Установлено, что валовой (теоретический) потенциал Миришкарского и Мубарекского районов, обладающих наибольшим потенциалом в регионе, на высоте 100 м составляет соответственно 342 и 337 млрд. кВт·ч, а технический потенциал 6,84 и 6,74 млрд. кВт·ч.



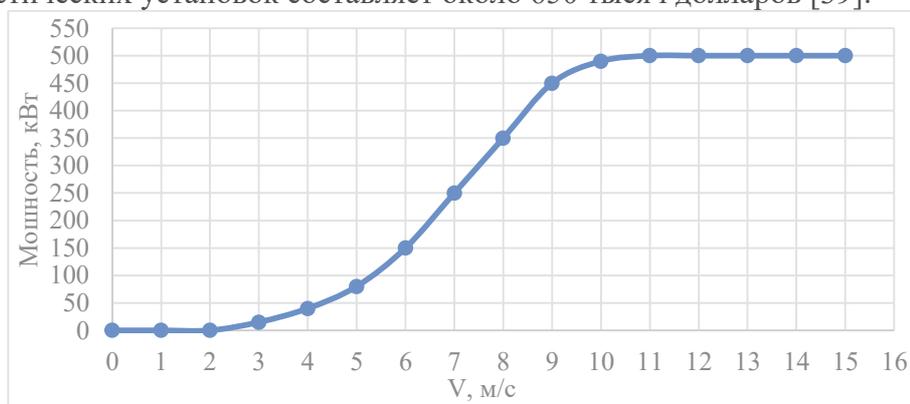
**Рис. 7. Результаты валового (а) и технического (б) потенциала ветроэнергетических ресурсов Кашкадарьинской области.**

На рис. 8 представлена карта ветров, оценивающая потенциал ветроэнергетических ресурсов Кашкадарьинской области. Эти данные были получены из Глобальной информационной системы “Global Wind Atlas”. Согласно результатам исследования и карте ветроэнергетических ресурсов области, Миришкорский и Мубарекский районы, которые близки с границей Бухарской области, обладают высоким ветроэнергетическим потенциалом. Суммарный валовой (теоретический) потенциал области на высоте 100 м составляет 2296,145 млрд. кВт·ч, а ее технический потенциал составляет 45,92 млрд. кВт·ч.



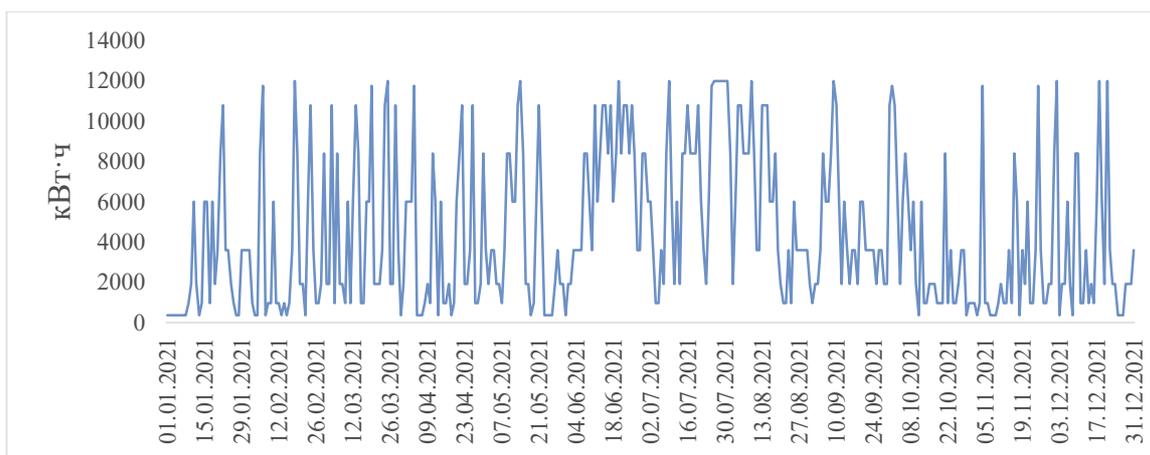
**Рис. 8. Карта оценки потенциала ветроэнергетических ресурсов Кашкадарьинской области.**

На рис. 9 приведена кривая мощности ветроэнергетической установки марки WD61 мощностью 500 кВт. Ветроэнергетическая установка диаметр ветротурбины которой составляет 61 м, устанавливается на высоте не более 100 метров и способна работать в диапазоне скорости ветра от 5 м/с до 25 м/с. В настоящее время средняя цена данных ветроэнергетических установок составляет около 650 тысяч долларов [39].



**Рис.9. Кривая мощности ветроэнергетической установки марки WD61 мощностью 500 кВт.**

На рис. 10 показан годовой объём электроэнергии, который способна выработать ветроэнергетическая установка марки WD61 мощностью 500 кВт, при установке на высоте 100 м в Миришкорском районе. По результатам моделирования было установлено, что данная ветроустановка способна выработать около 1,617 млрд. кВт·ч электроэнергии в год.



**Рис.10. Годовой показатель выработки электроэнергии ветроэнергетической установки марки WD61 мощностью 500 кВт.**

Исходя из технико-экономических возможностей Миришкорского района, было установлено что при установке ветроэлектростанции мощностью 500 кВт можно выработать около 1,617 млрд. кВт·ч электроэнергии в год. Срок службы ветроэнергетических установок составляет 20 лет, а ежегодные эксплуатационные расходы составляют примерно 1,5-2 % от их себестоимости [40].

В настоящее время для производства 1 кВт·ч электроэнергии на тепловой электростанции сжигается примерно 300- 350 грамм условного топлива. Для выработки 1,617 млрд. кВт·ч электроэнергии на тепловых электростанциях необходимо сжигание 480 тыс. тонн условного топлива или 417,4 млн кубометров природного газа. Это в свою очередь приводит к выбросам в окружающую среду около 298 тысяч тонн углекислого газа  $CO_2$ .

В настоящее время цена 1 м<sup>3</sup> газа поставляемого на тепловые электростанции в Узбекистане по состоянию на 2022 год составляет 1000 сум (0,09\$). С учетом вышеуказанных данных в таблице 4 приведены результаты прибыли в будущем при



установке ветроэлектростанции мощностью 500 МВт в Миришкорском районе, оцененные с использованием методики «Чистое дисконтирование».

Таблица 4

**Результаты оценки методом «Чистое дисконтирование»**

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| Чистый дисконтированный доход (NPV) | 1,8 трлн. сум |
| Внутренняя норма доходности (IRR)   | 35 %          |
| Индекс прибыльности (PI)            | 2,4           |
| Статический срок окупаемости (PP)   | 1,84          |
| Динамический срок окупаемости (DPP) | 2,33          |

По результатам проведенных исследований установлено, что Миришкорский район Кашкадарьинской области имеет наибольшую возможность использования энергии ветра. Строительство ветроэлектростанции мощностью 500 МВт в данном районе, может привести к выработке 1,617 млрд. кВт·ч электроэнергии в год. Таким образом, полученные научно-обоснованные результаты исследований является важной для инвесторов и частных компаний, занимающейся проектированием и строительством ветровых электростанций в условиях Кашкадарьинской области Узбекистана.

**Заключение.**

При оценке ветроэнергетического потенциала Кашкадарьинской области использовались данные NASA POWER, географическая информационная система (GIS) о скорости ветра на высоте 10 м в 2021 году. Согласно оценкам средняя скорость ветра на высоте 10 м составила 2,9-3,9 м/с.

При статистической обработке данных скорости ветра, полученных на высоте 10 м, использовалась двухпараметрическая функция распределения вероятностей Вейбулла. При определении двух параметров формы “к” и масштаба “с” функции распределения Вейбулла был использован эмпирический метод, обладающий высокой надежностью.

Установлено, что на высоте 10 метров средняя удельная мощность ветра составляет 20-40 Вт/м<sup>2</sup>, средняя удельная энергия 200-500 кВт·ч, а на высоте 100 метров при средней скорости ветра 4-5,8 м/с, средняя удельная мощность ветрового потока составила 113-253 Вт/м<sup>2</sup>, а средняя удельная энергия – 998,36-2208,03 кВт·ч.

Статистический анализ данных скорости ветра за 2021 год позволил оценить годовой валовой технический потенциал региона. Валовой ветроэнергетический потенциал на высоте 100 м. Составил 2296,15 млрд. кВт·ч, а технический потенциал составил 45,92 млрд. кВт·ч.

Теоретические расчеты показывают, что ветроэлектростанция мощностью 500 МВт, которую можно установить в Миришкорском районе, будет производить 1,617 млрд. кВт·ч электроэнергии в год и экономить 480 тыс. тонн условного топлива. При оценке экономических показателей использования энергии ветра в регионе применялась методика «Чистое дисконтирование». Установлено, что чистая приведенная стоимость составляет 1,8 трлн.сум, а динамический срок окупаемости 2,33 года.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Юнусов, Т.Ю. Производство энергии-современность и будущее [Текст]: монография / Т.Ю. Юнусов. –Т.: «Fan va texnologiya», 2012. -204 с.
2. Jaganmohan, M. Installed wind power capacity worldwide 2001-2021/ M. Jaganmohan // - (<https://www.statista.com/statistics/268363/installed-wind-power-capacity-worldwide>).
3. Global Wind Report 2021 // - (<https://gwec.net/global-wind-report-2021/>).
4. Zakhidov, R.A., Kremkov, M.V. The wind power potential of Uzbekistan [Текст] / R.A. Zakhidov, M.V. Kremkov // Applied Solar Energy, vol. 51, 2015, pp. 336–337.
5. Таджиев, У.А., Киселева, Е.И., Таджиев, М.У., Захидов Р.А. Особенности формирования ветровых потоков над территорией Узбекистана и возможности их использования для



- выработки электроэнергии Часть I [Текст] / У.А. Таджиев, Е.И. Киселева, М.У. Таджиев, Р.А. Захидов // Гелеотехника, 2015, № 1. С. 24-32.
6. Захидов, Р.А., Киселева, Е.И., Орлова, Н.И., Таджиев, У.А. О прогнозной стоимости электроэнергии, вырабатываемой горизонтально-осевыми ветроэлектростанциями в некоторых районах Узбекистана [Текст] / Р.А. Захидов, Е.И. Киселева, Н.И. Орлова, У.А. Таджиев // Гелеотехника, 2001, № 1. С. 36-42.
  7. Таджиев, У.А., Киселева, Е.И., Таджиев, М.У., Захидов Р.А. Прогнозные технико-экономические показатели ветроэлектрических установок, преобразующих энергию ветра приземных слоёв атмосферы равнинных территорий Узбекистана [Текст] / У.А. Таджиев, Е.И. Киселева, М.У. Таджиев, Р.А. Захидов // Гелеотехника. 2012. № 4. С. 60-68.
  8. POWER Data Access Viewer // - (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).
  9. Global wind atlas // - (<https://globalwindatlas.info/area/Uzbekistan/Kashkadarya>).
  10. Аун Тан, Ч.Н. Исследование эффективности комплексного использования возобновляемых источников энергии в региональной энергетике Мьянмы [Текст] / диссертация кан. физ.-мат. наук. 05.14.08. -Москва., 2014. -132 с.
  11. Рыхлов А.Б. Климатологическая оценка ветроэнергетического потенциала на различных высотах: на примере Юго-Востока Европейской территории России [Текст] / диссертация кан. тех. наук. 25.00.30. - Саратов., 2012. -255 с.
  12. Mentis D, Hermann S, Howells M, Welsch M, Hussain Sh. Assessing the technical wind energy potential in Africa a GIS-based approach [Текст] / D. Mentis, S. Hermann, M. Howells, M. Welsch, Sh. Hussain // Renewable Energy, vol. 83. 2015. pp. 110-125.
  13. Kilich B. Determination of wind dissipation maps and wind energy potential in Burdur province of Turkey using geographic information system (GIS) / B. Kilich // Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 36, 2019. 100555.
  14. Allouhi A, Zamzoum O, Islam M.R, Kousksou T, Jamil A, Derouich A. Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions [Текст] / A. Allouhi, O. Zamzoum, M.R. Islam, T. Kousksou, A. Jamil, A. Derouich // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 72. 2017. pp.311-324.
  15. Ahmed S.A, Mahammed H.O. A Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Ralyeigh models of "Penjwen Region" Sulaimani/Iraq [Текст] / S.A. Ahmed, H.O. Mahammed // JJMIE, vol. 6. N. 2. 2012. pp. 135-140.
  16. Ozay C, Celiktas M.S. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alacati region [Текст] / C. Ozay, M.S Celiktas // Energy Conversion and Management, 2016 v.121. pp. 49-54.
  17. Yazidia M, Redouane A, Benzirar M, Zazoui M. Analysis of Wind Data and Assessment of Wind Energy Potential in Lamhiriz Village, Morocco [Текст] / M. Yazidia, A. Redouane, M. Benzirar, M. Zazoui // Renewable Energy Sources, 2019. Vol. 55, No. 6, pp. 429-437.
  18. Hatata A.Y, Mousa M.G, Elmahdy R.M. Analysis of wind data and assessing wind energy potentiality for selected locations in Egypt [Текст] / A.Y. Hatata, M.G. Mousa, R.M. Elmahdy // International Journal of Scientific Engineering Research. 2015. Vol. 6. Issue 3. pp. 604-609.
  19. Azad A.K, Rasul M.G, Islam R, Shishir I.R. Analysis of Wind Energy Prospect for Power Generation by Three Weibull Distribution Methods [Текст] / A.K. Azad, M.G. Rasul, R. Islam, I.R. Shishir // Energy Procedia. 2015. Vol. 75. pp. 722-727.
  20. Hamed H, Vahid M. Techno-economic analysis of wind energy potential in Kazakhstan. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A [Текст] / H. Hamed, M. Vahid // Journal of Power and Energy. 2021, 235(6):095765092110015
  21. Gamma function table. - (<https://getcalc.com/statistics-gamma-function-table.htm>).
  22. Elistratov V, Ramadan A. Energy potential assessment of solar and wind resources in Syria [Текст] / V. Elistratov, A. Ramadan // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol.16. pp. 208-216.





23. Serban A, Simona L.P, Paraschiv S. Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models [Текст] / A. Serban, L.P. Simona, S. Paraschiv // Energy Reports. 2020. Vol. 6, pp. 250-267.
24. Mousaad A, Whipple J. Wind Forces on Ground-Mounted Photovoltaic Solar Systems: A Comparative Study [Текст] / A. Mousaad, J. Whipple // Applied Solar Energy. 2021. Vol. 57, pp. 444–471.
25. Rasham M. Analysis of Wind Speed Data and Annual Energy Potential at Three locations in Iraq [Текст] / M. Rasham // International Journal of Computer Applications. 2016. Vol.137, pp. 11-16.
26. Soulouknga M, Doka S, Revanna N, Djongyang N, Kofane T. Analysis of wind speed data and wind energy potential in Faya-Largeau, Chad, using Weibull distribution [Текст] / M. Soulouknga, S. Doka, N. Revanna, N. Djongyang, T. Kofane // Renewable energy. 2018. Vol.121. pp.1-8.
27. Muhammad A, Ahmad J, Ali S, Imran M. A techno-economic analysis for power generation through wind energy: A case study of Pakistan [Текст] / A. Muhammad, J. Ahmad, S. Ali, M. Imran // Energy Reports. 2021, Vol. 7. pp. 1424-1443.
28. Zohbi, G.A. Wind characteristics and wind energy potential analysis in five sites in Lebanon. Int. J [Текст] / G. Al Zohbi, P. Hendrick, P. Bouillard // Hydrog. Energy. 2015. Vol.40. pp. 15311–15319.
29. Sadullayev, N. Statistical Analysis of Wind Energy Potential in Uzbekistan’s Bukhara Region Using Weibull Distribution [Текст] / N. Sadullayev, A. Safarov, Sh. Nematov, R. Mamedov // Applied Solar Energy. 2019. Volume 55, Issue 2, pp 126-132.
30. Amir, T. Assessment of wind energy potential in the southeastern province of Iran [Текст] / T. Amir, B. Arian, T. Hanifa, V. Maryam, O.H. Abdullah // Energy Sources, Part A: Recovery, Util, Environ. Eff. 2019. Vol.42, pp. 329-343.
31. Fetisova, Y.A. Determining the Parameters of Weibull Function to Estimate the Wind Power Potential in Conditions of Limited Source Meteorological Data [Текст] / Y.A. Fetisova, B.V. Ermolenko, G.V. Ermolenko, S.V. Kiseleva // Thermal Engineering. 2017, Vol. 64, No. 4, pp. 251–257.
32. Безруких, П.П. Ветроэнергетика [Текст]: учеб. для вузов / П.П. Безруких, С.В. Грипков. - М.: “Интерэнерго-Издат”, “Теплоэнергетика”, 2014. -304 с.
33. Безруких, П.П. Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии [Текст] / диссертация док. тех. наук. –Москва., 2003. -268 с.
34. Adeyeye, K. A Techno-Economic Model for Wind Energy Costs Analysis for Low Wind Speed Areas [Текст] / K. Adeyeye, N. Ijumba, J. Colton // Processes. 2021, V.9, pp. 1463-1470.
35. Oliveira, W. Investment analysis for wind energy projects [Текст] / W. Oliveira, A. Fernandes // Revista Brasileira de Energia. 2013. Vol. 19, N 239. pp. 239-285.
36. Шермухамедов, У. Экономическая оценка использования ветровых энергетических установок / У. Шермухамедов, М. Холбоев // Прогрессивные технологии и процессы сборник научных статей 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. -Курск, 2020. 179-184 с.
37. Khambalkar, V. Wind energy cost and feasibility of a 2 MW wind power project [Текст] / V. Khambalkar, S.R. Gadge, S.B. Dahatonde, M.U. Kale // International Energy Journal. 2007. Vol. 8. pp. 285-290.
38. Султанов, И.А. Применение дисконтированного срока окупаемости / - (<http://projectimo.ru/ocenka-ehffektivnosti/diskontirovannyj-srok-okupaemosti.html>).
39. DW61-500kW wind turbine. - ([https://ewtdirectwind.com/wp-content/uploads/2018/04/EWT\\_Flyer-DW61-500kW\\_HR.pdf](https://ewtdirectwind.com/wp-content/uploads/2018/04/EWT_Flyer-DW61-500kW_HR.pdf)).
40. Operational and Maintenance Costs for Wind Turbines / - (<http://www.windmeasurementinternational.com/wind-turbines/om-turbines.php>).