

**Охрана окружающей среды и природопользование**

**ПОРЯДОК ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ  
РАЗМЕЩЕНИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТЕРРИТОРИИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне**

**ПАРАДАК АЦЭНКІ ВЕТРАЭНЕРГЕТЫЧНАГА ПАТЭНЦЫЯЛА ПРЫ  
РАЗМЯШЧЭННІ ВЕТРАЭНЕРГЕТЫЧНЫХ УСТАНОВАК НА ТЭРЫТОРЫІ  
РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ**

**Издание официальное**



**Минприроды**

**Минск**

**Ключевые слова:** ветроэнергетический потенциал, пункт гидрометеорологических наблюдений, шероховатость подстилающей поверхности

---

### Предисловие

Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».

Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению техническим нормированием и стандартизацией в области охраны окружающей среды установлены Законом Республики Беларусь «Об охране окружающей среды».

1 РАЗРАБОТАН Государственным учреждением “Республиканский гидрометеорологический центр”, подчиненным Министерству природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь

ВНЕСЕН Департаментом по гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 30 марта 2012 г. № 12-Т

3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Настоящий технический кодекс установившейся практики не может быть воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь

---

## Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки.....	1
3	Термины и определения.....	2
4	Общие положения.....	2
5	Порядок оценки ветроэнергетического потенциала.....	2
	5.1 Оценка ветроэнергетических ресурсов.....	3
	5.2 Оценка влияния рельефа местности и локальных атмосферных условий на энергетические характеристики ВЭУ.....	4
	5.3 Оптимизация выработки энергии.....	4
6	Рекомендации по размещению ветроэнергетических установок и ветроэнергетических станций (ветропарков) на территории Республики Беларусь.....	4
	Приложение А (рекомендуемое) Районирование территории Республики Беларусь по скоростям ветра.....	6
	Приложение Б (рекомендуемое) Порядок оценки удельной мощности ветрового потока и среднегодовой выработки энергии.....	7
	Приложение В (рекомендуемое) Определение шероховатости подстилающей поверхности.....	10
	Библиография.....	15



**ТЕХНИЧЕСКИЙ КОДЕКС УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПРАКТИКИ**

---

**Охрана окружающей среды и природопользование  
ПОРЯДОК ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ  
РАЗМЕЩЕНИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ****Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне  
ПАРАДАК АЦЭНКІ ВЕТРАЭНЕРГЕТЫЧНАГА ПАТЭНЦЫЯЛА ПРЫ  
РАЗМЯШЧЭННІ ВЕТРАЭНЕРГЕТЫЧНЫХ УСТАНОВАК  
НА ТЭРЫТОРЫІ РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ**

Environmental protection and nature use.

The evaluation procedures of wind power resources assessment for wind-power installation placement on the territory of the Republic of Belarus

---

**Дата введения 2012-07-01****1 Область применения**

Настоящий технический кодекс установившейся практики (далее – технический кодекс) устанавливает общий порядок оценки ветроэнергетического потенциала (далее – ВЭП) при планировании размещения ветроэнергетических установок (далее – ВЭУ).

Требования настоящего технического кодекса являются обязательными для исполнения всеми юридическими и физическими лицами, осуществляющими работы в области оценки ВЭП и по рациональному размещению ВЭУ на территории Республики Беларусь.

**2 Нормативные ссылки**

В настоящем техническом кодексе использована ссылка на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА):

ТКП 17.02-02-2010 (02120) Охрана окружающей среды и природопользование. Правила размещения и проектирования ветроэнергетических установок.

ГОСТ Р 51237-98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения

Примечание – При пользовании настоящим техническим кодексом целесообразно проверить действие ТНПА по каталогу, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году.

Если ссылочные ТНПА заменены (изменены), то при пользовании настоящим техническим кодексом следует руководствоваться замененными (измененными) ТНПА. Если ссылочные ТНПА отменены без замены, то положение, в котором дана ссылка на них, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

**3 Термины и определения**

В настоящем техническом кодексе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1 валовой потенциал ветроэнергетических ресурсов:** Расчетная величина мощности ветрового потока без учета свойств и возможностей ветродвигателя (ГОСТ Р 51237).

**3.2 ветроэнергетический потенциал:** Энергетический эквивалент ветрового потока какой-либо местности на определенной высоте над поверхностью земли (ГОСТ Р 51237).

**3.3 кривая мощности ветроэнергетической установки:** Зависимость мощности, вырабатываемой ветроэнергетической установкой от скорости ветра (ГОСТ Р 51237).

**3.4 технический потенциал ветроэнергетических ресурсов:** Определяется мощностью ветрового потока, связанного с определенным типом ветродвигателя и характеризует возможности получения ветровой энергии определенным типом ветроэнергетических установок (ГОСТ Р 51237).

**3.5 экономический (реальный) потенциал ветроэнергетических ресурсов:** Часть технического потенциала, которую можно реализовать с экономически оправдываемыми затратами по сравнению с традиционными энергоресурсами.

## **4 Общие положения**

В качестве исходных требований к выбору мест размещения ВЭУ должно быть наличие достаточного ВЭП территории планируемого их размещения применительно к проектной мощности ВЭУ.

## **5 Порядок оценки ветроэнергетического потенциала**

Основной оценочный показатель ВЭП – скорость ветра – зависит от двух основных факторов: атмосферной циркуляции над территорией Республики Беларусь и характера подстилающей поверхности.

Значения ВЭП на территории Республики Беларусь различаются как на региональном уровне (между различными регионами), так и в пределах одного региона, поэтому выбор оптимального места размещения ВЭУ, а также подбор наиболее эффективного типа ВЭУ для заданного места размещения – основные задачи развития ветроэнергетики.

В первом приближении ВЭП предполагаемой площадки размещения ВЭУ оценивается по данным о средней годовой скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли в пунктах приземных метеорологических наблюдений [1], [2]. Для такой оценки с целью устранения влияния факторов защищенности пунктов приземных метеорологических наблюдений измеренную фактическую среднегодовую скорость ветра следует привести к показателю средней годовой фоновой скорости ветра (класс открытости во всех направлениях ветра – ровная открытая местность вдали от водных объектов).

Для более точной оценки эффективности работы ВЭУ необходима информация о продолжительности во времени диапазона рабочих скоростей ВЭУ. Многолетние данные о параметрах ветра в пунктах гидрометеорологических наблюдений, а также данные о параметрах ветра на различных высотах от поверхности земли дают возможность оценить ВЭП территории Республики Беларусь. При этом учитываются следующие основные положения:

– влияние на метеорологические измерения параметров ветра конкретных местных условий;

– повторяемость скорости ветра в течение года и по месяцам;

– распределение ветровых периодов и периодов затишья по длительности;

– максимальную скорость ветра;

– удельную энергию ветрового потока.

На основании показателей среднегодовых распределений скоростей ветра выделены ветровые зоны на территории Республики Беларусь на предмет приоритетности внедрения ВЭУ (Приложение А)

### **5.1 Оценка ветроэнергетических ресурсов**

Для описания ветра как источника энергии используется совокупность гидрометеорологических и энергетических параметров ветра, к которым относятся:

- среднегодовая скорость ветра;
- годовой и суточный ход скорости ветра;
- повторяемость скоростей ветра;
- повторяемость направлений ветра;
- максимальная скорость ветра;
- удельная мощность и удельная энергия ветра;
- ветроэнергетические ресурсы района.

Ветровой режим предполагаемой площадки размещения ВЭУ моделируется по многолетним данным одного или нескольких репрезентативных для рассматриваемого региона пунктов гидрометеорологических наблюдений, расположенных в сходных климатических условиях на расстоянии не более 100 км до выбранного пункта, или на основании проведенных измерений параметров ветра перед возведением ВЭУ (мониторинг параметров ветра).

Мощность ветрового потока пропорциональна плотности воздуха, площади поперечного сечения потока, ометаемого ветроротором, и скорости ветра в третьей степени. В силу кубической зависимости от величины скорости ветра мощность ветрового потока изменяется в широких пределах. Среднегодовая удельная энергия ветра – энергия, протекающая за год через 1 м<sup>2</sup> поперечного сечения – является интегральной (осредняющей) характеристикой. Она зависит, в том числе, и от повторяемости различных скоростей ветра в течение года.

На основании данных о среднегодовых скоростях ветра, вертикальном профиле ветра, повторяемости средних скоростей ветра по градациям дается энергетическая характеристика ветрового потока в любом пункте на любой высоте от поверхности земли. При оценке ветроэнергетических ресурсов рассматривается их валовый, технический и экономический ВЭП.

Оценка ветроэнергетических ресурсов включает диапазон от полной оценки средней энергии ветра по большой области (региональной оценки) до оценки среднего ежегодного производства энергии определенной ВЭУ в определенном местоположении – оценка для участка. Информация для участка должна быть намного более детальной, чем для региональной оценки. Оба случая используют общие понятия анализа топографии и данных о ветровом режиме предполагаемой площадке размещения ВЭУ [3].

Для расчета выработки энергии от конкретной ВЭУ на предполагаемой площадке размещения ВЭУ необходима кривая мощности ВЭУ и функция плотности вероятности скорости ветра на высоте ветроротора ВЭУ. Произведение этих двух функций дает кривую плотности мощности, интеграл которой – среднее производство энергии. Этот интеграл, наиболее часто, оценивается в терминах параметров распределения Вейбулла и аппроксимации кривой мощности кусочно-линейной функцией (Приложение Б).

Для вычисления производства электрической энергии ВЭУ необходимы климатические параметры ветра на предполагаемой площадке размещения ВЭУ и параметры ВЭУ:

- высота размещения ветроротора;
- кривая мощности ВЭУ;
- кривая коэффициента доверительности.

## **5.2 Оценка влияния рельефа местности и локальных атмосферных условий на энергетические характеристики ВЭУ**

Основными факторами влияния топографии местности на параметры ветра являются: затенение объекта препятствиями, шероховатость подстилающей поверхности земли и орография местности (Приложение В). К затеняющим препятствиям относятся различные здания, сооружения и пр. Вертикальный масштаб зоны их влияния на ветер распространяется примерно на высоту, втрое превышающую высоту препятствия, а горизонтальный – на расстояние, превышающее высоту препятствия в 30-40 раз. Такие

орографические элементы, как холмы, утесы, крутые насыпи и гребни гор, оказывают дополнительное влияние на ветер, у вершины таких элементов ветер ускоряется, а у их подножья и в долинах замедляется.

Существуют следующие основные показатели влияния топографии на параметры ветра в месте их измерения:

- шероховатость подстилающей поверхности;
- рельеф окружающей территории;
- эффекты экранирования (затенения) зданиями и сооружениями.

### 5.3 Оптимизация выработки энергии

Мерой эффективности ВЭУ является отношение ее мощности при данной скорости ветра к общей мощности ветрового потока, проходящего через ветроротор ВЭУ. Оптимальное использование энергии ветра достигается, когда максимум коэффициента полезного действия (далее – КПД) ВЭУ совпадает с максимумом функции распределения мощности, следовательно, кривую мощности ВЭУ следует подбирать с учетом функции распределения скорости ветра (Приложение Б)

Факторами, определяющими энергетические характеристики и эффективность работы ВЭУ, являются:

- особенности размещения каждой ВЭУ (закрытость каждой ВЭУ, шероховатость подстилающей поверхности, расстояние между ВЭУ, расположение по ярусам);
- использование свойств рельефа местности (размещение ВЭУ на вершинах холмов, на наветренных склонах, в ветровых коридорах, долинах рек и т.п.);
- климатические особенности территорий (влияние преобладающих направлений ветрового потока и скоростей ветра и т.п.);
- близость больших водных массивов (моря, водохранилища, озера и т.п.).

## 6 Рекомендации по размещению ветроэнергетических установок и ветроэлектрических станций (ветропарков) на территории Республики Беларусь

Основным условием для проектировщиков ВЭУ и ветроэлектрических станций или ветропарков (далее – ВЭС) является подбор ВЭУ под требования заказчика и соответствие их технико-энергетических характеристик условиям размещения.

Характеризующим показателем использования ВЭУ является номинальная рабочая скорость ветра, соответствующая номинальной мощности ВЭУ.

Выбор оптимальных мест установки ВЭУ основывается на оценке средних значений мощности, выработанной той или иной ВЭУ в заданном месте. Окончательный выбор места осуществляется с учетом наличия альтернативных источников электроснабжения, линии электропередач и распределительных подстанций и т.п.

При строительстве ВЭС должно быть учтено расположение отдельных ВЭУ в составе ВЭС, т. к. оно оказывает большое влияние на эффективность всего комплекса.

Согласование мест и порядка размещения ВЭУ и ВЭС высотой свыше 50 м осуществляется в соответствии с законодательством Республики Беларусь и действующими техническими нормативными правовыми актами [4], [5].

Процедура подбора места установки ВЭУ включает следующие этапы работ:

- определение соответствующего регионального ветрового режима;
- определение влияния шероховатости окружающей территории;
- определение влияния близлежащих затеняющих препятствий;
- определение местного рельефа;
- построение результирующего распределения повторяемости скоростей ветра (например, по распределению Вейбулла);



– расчет среднего значения мощности ветрового потока на основе распределения повторяемости скоростей ветра (например, по Вейбуллу) и установленной мощности ВЭУ.

Предполагаемые площадки размещения ВЭУ и ВЭС выбираются из расчета достаточного высокого ВЭП территории, на которой они смогут вырабатывать максимальное количество энергии, следующим образом:

- выделяются самые возвышенные и безлесные участки местности на топографических картах региона, на которых вероятны наиболее сильные ветры;
- отобранные участки детально анализируются на крупномасштабных топографических картах, на которых выявляются отдельные, компактно расположенные безлесные холмы, пригодные для размещения на них ВЭУ.

Дополнительное требование – отсутствие или незначительная повторяемость ураганных ветров (при скорости ветра более 33 м/с) и малое число буревых периодов (при скорости ветра более 20 м/с).

При создании ветроэнергетической отрасли страны необходимо ориентироваться на строительство ВЭС. Экономическая выгода ВЭС заключается в следующем:

- общая для всех ВЭУ трансформаторная подстанция;
- единая система управления, контроля, технического обслуживания и ремонта.

Состав прогнозируемых к применению на территории Республики Беларусь ветроэлектрических парков определяется следующими основными показателями:

- энергетической составляющей каждой ВЭУ, оцениваемой по соотношению номинальной рабочей скорости ветра с номинальной мощностью ВЭУ.
- использование свойств рельефа (размещение ВЭУ на вершинах холмов, на наветренных склонах, в ветровых коридорах и т. п.) и климатических особенностей для каждой строительной площадки под ВЭУ на территории ВЭС;
- ориентацией на особенности потребителя электроэнергии от ВЭС;
- экологической безопасностью;
- экономической эффективностью.

При этом должны быть учтены следующие факторы, определяющие оптимизацию строительства и эффективность работы:

- близость территории ВЭС к государственным или местным электросетям сетям энергосистемы (максимальная удаленность площадок под ВЭУ от существующей сети линий электропередачи должна быть не более 1,5 км);
- наличие поблизости действующих трансформаторных подстанций и их мощности;
- наличие подъездных дорог к месту строительства ВЭС;
- расстояние до места изготовления ВЭУ;
- наличие жилья для обслуживающего персонала ВЭС, удобство эксплуатации и сохранности ВЭУ;
- размер территории, необходимой для размещения заданного количества ВЭУ;
- особенности размещения каждой ВЭУ (закрытость каждой ВЭУ, шероховатость подстилающей поверхности, расстояние между ВЭУ, расположение по ярусам);
- качество грунта под строительство;
- качество отчужденных сельскохозяйственных угодий;
- удаленность ВЭУ от дорог и жилых строений согласно требований ТКП 17.02-02.

**Приложение А**  
(рекомендуемое)

**Районирование территории Республики Беларусь по скоростям ветра**

Районирование территории Республики Беларусь по данным о средних годовых фоновых и расчетных скоростях ветра на пунктах гидрометеорологических наблюдений государственной сети гидрометеорологических наблюдений с учетом абсолютных отметок над уровнем моря [2], [6]:

**Таблица А.1** – Районирование территории Республики Беларусь по скоростям ветра

Показатели	Характеристики регионов					
	I	II	III	IV	V	
Высота над уровнем моря, м	100–150	150–200	200–250	250–300	300–350	Всего
Площадь региона, км <sup>2</sup>	91471	99421	13907	2283	208	207560
Площадь для размещения ВЭУ, км <sup>2</sup>	18348	19884	2781	457	42	41512
Процент от площади региона, %	20	20	20	20	20	20
Среднегодовая фоновая скорость ветра, м/с на высоте 10 м	2,9–3,2	3,3–3,4	3,5–3,6	3,7–3,9	4,0–4,2	
Среднегодовая расчетная скорость ветра, м/с на высоте 40 м	3,8–4,2	4,3–4,5	4,6–4,8	4,9–5,2	5,3–5,7	
Среднегодовая расчетная скорость ветра, м/с на высоте 60 м	4,3–4,7	4,8–5,1	5,2–5,4	5,5–5,8	5,9–6,2	
Среднегодовая расчетная скорость ветра, м/с на высоте 80 м	4,8–5,2	5,3–5,6	5,7–5,8	5,9–6,3	6,4–6,7	
Среднегодовая расчетная скорость ветра, м/с на высоте 100 м	5,2–5,6	5,7–6,0	6,1–6,3	6,4–6,7	6,8–7,1	

Примечание:

- таблица построена по данным зависимости средней скорости ветра от абсолютной высоты конкретных пунктов гидрометеорологических наблюдений и не учитывает наличия в пределах ближайшего окружения пункта гидрометеорологических наблюдений возвышенностей, холмов, плато и проч., средние годовые скорости на которых могут быть выше;
- на отдельных равнинных территориях Гродненской, Минской и Могилевской областей Республики Беларусь приземные скорости и скорости на высотах превышают указанные предельные значения.

**Приложение Б**  
(рекомендуемое)

**Порядок оценки удельной мощности ветрового потока и среднегодовой выработки энергии**

**Б.1 Зависимость мощности ВЭУ от скорости ветра**

Зависимость мощности, вырабатываемой ВЭУ, от скорости ветра называется кривой мощности. При скорости ветра меньше пусковой скорости ВЭУ ее мощность равна нулю. При превышении скоростью ветра пусковой скорости, мощность ВЭУ увеличивается по мере увеличения скорости ветра до максимального значения – номинальной мощности, после чего она поддерживается по возможности постоянной [7].

Для ВЭУ с заданной кривой мощности  $P(u)$  средняя вырабатываемая мощность ( $P$ ) в данном месте определяется с использованием функции распределения скорости ветра  $f(u)$  на высоте ветроротора ВЭУ по формуле:

$$P = \int_0^{\infty} f(u) P(u) du \quad (\text{Б.1})$$

Функция  $f(u)$  может определяться:

– экспериментально;  
– на основе гидрометеорологических данных ближайших пунктов гидрометеорологических наблюдений [2].

Если функция распределения скорости ветра  $f(u)$  аппроксимируется функцией Вейбулла, то выражение для средней мощности ВЭУ ( $P$ ) имеет вид:

$$P = \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) P(u) du \quad (\text{Б.2})$$

где  $k$  – параметр формы в распределении Вейбулла, индекс;

$A$  – масштабный параметр в распределении Вейбулла, эмпирическая постоянная в законе геострофического трения ( $=A(0)$ );

$\exp(x)$  – экспоненциальная функция.

Для вычисления этого интеграла используются численные методы.

Для большинства ВЭУ кривая мощности удовлетворительно аппроксимируется кривой простой формы. В этом случае выражение для мощности ВЭУ имеет вид:

$$P = \frac{P_{\max}}{\alpha_2 - \alpha_1} (G_k(\alpha_2) - G_k(\alpha_1) - \exp(-\alpha_3^k)) \quad (\text{Б.3})$$

где  $\alpha$  – скорость ветра, разделенная на  $A$ , угол.

**Б.2 Определение удельной мощности ветрового потока.**

Функция распределения ветра по скоростям, аппроксимируемая аналитической двухпараметрической функцией Вейбулла, требуется при решении большинства практических задач ветроэнергетики. С ее помощью определяется удельная мощность ветра  $E(u)$ :

$$E(u) = \rho u^3 \cdot f(u) / 2, \quad (\text{Б.4})$$

## ТКП 17.10-39-2012

где  $f(u)$  – распределение Вейбулла, определенное для данного места, достигающее максимума при скорости ветра

$$u = A \left( \frac{k+2}{k} \right)^{1/k}. \quad (\text{Б.5})$$

### Б.3 Оптимизация выработки энергии.

Мерой эффективности ВЭУ является отношение ее мощности при данной скорости ветра к общей мощности ветрового потока, проходящего через ветроколесо. Оптимальное использование энергии ветра достигается, когда максимум КПД ВЭУ совпадает с максимумом функции распределения мощности. Таким образом, кривую мощности ВЭУ следует подбирать с учетом функции распределения скорости ветра.

В предположении, что ВЭУ имеет простую кусочно-линейную кривую мощности, кривая КПД описывается выражением:

$$C_p(u) = \frac{P(u)}{E(u) \cdot A_R} = \frac{s(u-u_1)}{0,5\rho u^3 \cdot A_R}, u_1 \leq u \leq u_2, \quad (\text{Б.6})$$

где  $P(u)$  – это выработка энергии при скорости ветра  $u$ ,

$E(u)$  – мощность ветрового потока, проходящего через ометаемую ветроротором площадь  $A_R$ ,

$s$  – наклон кривой мощности:

$$s = \frac{P_{\max}}{u_2 - u_1}. \quad (\text{Б.7})$$

Максимальный КПД достигается при скорости ветра  $u_m$ , определяемой дифференцированием:

$$u_m = 1,5u_1 \quad (\text{Б.8})$$

Кривая мощности с учетом этого может быть представлена в виде:

$$P(u) = \frac{3}{2} \rho C_p(u_m) A_R \cdot u_m^2 \left( u - \frac{2}{3} u_m \right) \text{ для } u_1 \leq u \leq u_2 \quad (\text{Б.10})$$

Это выражение содержит параметры, описывающие основные характеристики ВЭУ:

–  $A_R$  – площадь, ометаемая ветроротором;

–  $C_p(u_m)$  – максимальный КПД ВЭУ;

–  $u_m$  – скорость ветра при которой КПД достигает максимума;

–  $u_2$  – скорость ветра, соответствующую номинальной мощности.

Обычно максимальный КПД ВЭУ достигается при скорости ветра несколько меньшей той, которая соответствует максимуму функции распределения по скоростям ветра

### Б.4 Оценка среднегодовой выработки энергии (W) ВЭУ.

Производится по формуле:

$$W = N_e S \xi_{\text{ном}} \eta_{\text{эм}} T_e \quad (\text{Б.11})$$

где  $N$  – установленная мощность ВЭУ,

$S$  – ометаемая ветроколесом площадь, м<sup>2</sup>;  $S = \pi D^2 / 4$ ;

$\xi$  – коэффициент использования энергии ветра,  $\xi=0,36$ ;

$\eta_{эм}$  – электромеханический КПД ВЭУ,  $\eta_{эм} = 0,9$ ;

$T_e$  – длительность года, ч.

На предполагаемой площадке размещения ВЭУ предварительно измеряется или рассчитывается средняя годовая скорость ветра, которая наряду с техническими характеристиками ВЭУ, является важнейшим фактором влияния на экономическую целесообразность строительства ВЭУ.

## Приложение В (рекомендуемое)

### Определение шероховатости подстилающей поверхности

Ветроэнергетические ресурсы на месте внедрения ВЭУ зависят от ряда факторов: открытости объекта, шероховатости подстилающей поверхности, естественных концентраторов ветра, высоты расположения ВЭУ над поверхностью земли, выбранного типа ВЭУ и т.д [7].

Шероховатость определенного участка подстилающей поверхности определяется размером и расположением элементов шероховатости (неровности). Для поверхности суши основными элементами шероховатости обычно являются растительность, застроенные области и тип почвы.

Существует два способа описания характеристик шероховатости поверхности, окружающей площадку расположения ВЭУ в виде:

- цифровых карт с изображением линий изменения шероховатости, т.е. линий, разделяющих области с одинаковой шероховатостью;
- описания специфики шероховатостей площадки расположения ВЭУ с выделением преимущественного направления расположения шероховатостей.

В первом случае преимущественное направление шероховатости вычисляется с помощью карт шероховатостей, во втором случае – роза шероховатостей определяется опытным путем, что обеспечивает большую точность описания шероховатости выбранной площадки.

#### В.1 Классификация территорий по классу шероховатости.

Территория Республики Беларусь по особенностям рельефа разделена на четыре типа, каждый из которых характеризуется своими элементами шероховатости и может быть отнесен к определенному классу.

Классу 0 (поверхность воды) соответствует поверхности водохранилищ и озер; размер шероховатости  $z_0 = 0,0002$  м (рисунок В.1)

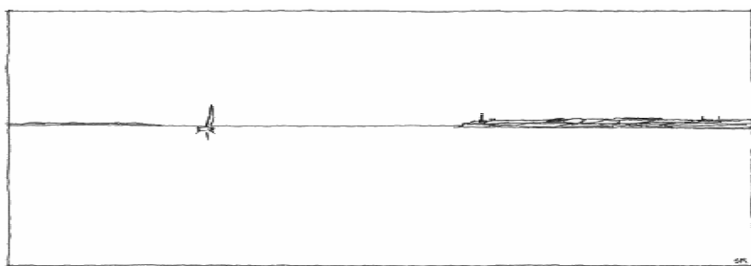


Рисунок В.1 – Пример территории с шероховатостью класса 0

Классу 1 соответствуют открытые области с небольшими лесозащитными полосами (равнины или небольшие холмы). Могут быть фермерские постройки, отдельно стоящие деревья или кустарники. Размер шероховатости  $z_0 = 0,03$  м (рисунок В.2).



Рисунок В.2 – Пример территории с шероховатостью класса 1

Классу 2 соответствуют территории хозяйственных земель с небольшими лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет 1000 м, с разбросанными областями построек. Территория характеризуется большими открытыми областями между лесозащитными полосами, придающими ландшафту открытый внешний вид. Территория может быть ровной или слегка холмистой, на ней может быть множество деревьев и зданий. Размер шероховатости  $z_0 = 0,10$  м (рисунок В.3)



Рисунок В.3 – Пример территории с шероховатостью класса 2

Классу 3 соответствуют территории с городскими застройками, лесом или сельскохозяйственные земли с многочисленными лесозащитными полосами. Сельскохозяйственные угодья характеризуются многочисленными близкорасположенными лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет несколько сотен метров. Леса и городские застройки также принадлежат к этому классу. Размер шероховатости составляет  $z_0 = 0,40$  м (рисунок В.4).

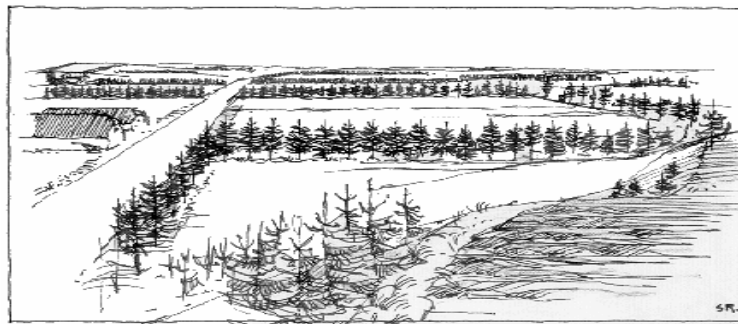


Рисунок В.4 – Пример территории с шероховатостью класса 3

Шероховатость поверхности обычно характеризуют высотой шероховатости  $z_0$ . Фактически  $z_0$  – это высота, на которой скорость ветра становится равной 0, если профиль скорости имеет логарифмический характер изменения. Элемент шероховатости характеризуется высотой  $h$  и поперечным сечением  $S$ . Для элементов шероховатости, распределенных более или менее равномерно по площади, вводится дополнительный параметр – площадь  $A_h$ , приходящаяся на один элемент. Тогда  $z_0$  описывается следующим соотношением:

$$z_0 = 0.5 \times \frac{h \times S}{A_h} . \quad (\text{В.1})$$

Это соотношение справедливо при  $A_h \ll S$ . При сравнимых величинах  $A_h$  и  $S$  соотношение дает завышенные значения  $z_0$  вследствие того, что воздушный поток как бы приподнимается над близлежащими элементами шероховатости.

Технология формирования векторных карт включает в себя создание специализированных форматов файлов, которые могут быть использованы при дальнейшей компьютерной обработке топологических и метеорологических данных.

Линии, отделяющие области различной шероховатости, называются линиями изменения шероховатости. Несмотря на то, что контурным линиям высоты ставится в соответствие только одно значение, то есть возвышение над уровнем моря, линиям изменения шероховатости соответствуют два значения характерной длины шероховатости  $z_{0l}$  и  $z_{0r}$ , найденные с обеих сторон линии.

Кроме того, должны быть определены начальная и конечная точки каждой линии изменения шероховатости. При движении вдоль линии от начальной до конечной точки левая и правая стороны линии определены однозначно и характерные длины шероховатости могут рассматриваться как левосторонняя  $z_{0l}$  и правосторонняя  $z_{0r}$  длины шероховатости, соответственно. Характеристики линий изменения шероховатости представлены на фрагменте карты (рисунок В.5).

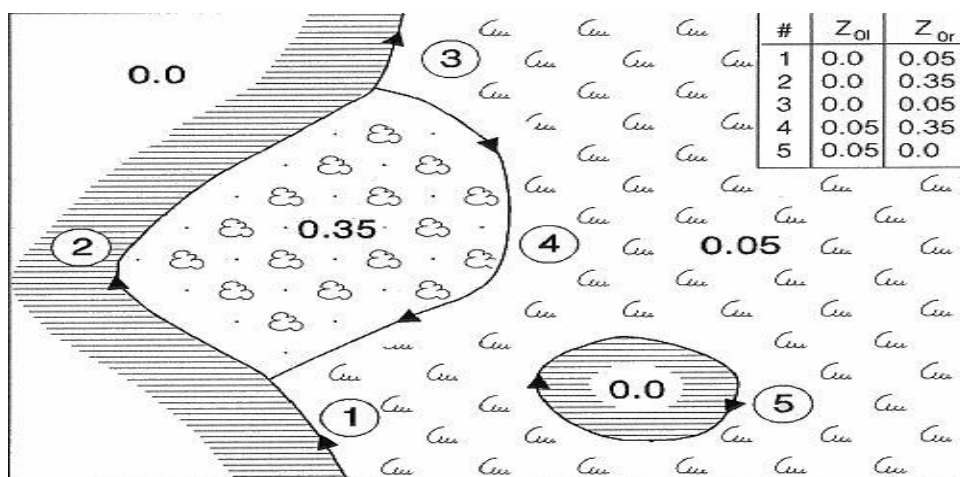


Рисунок В.5 – Фрагмент карты с различной шероховатостью

Как и данные о контурах высоты, данные о шероховатости хранятся в файле карты, включая значения и координаты линий шероховатости. Порядок координат в файле определяет начальные и конечные точки линий. Контурные линии высоты и линии изменения шероховатости могут присутствовать в одном и том же файле карты или могут быть сохранены в различных файлах. Очевидно, системы координат должны быть теми же самыми в обоих случаях.

Определенные особенности в ландшафте, прежде всего береговые линии, могут представлять одновременно и контур высоты и линию изменения шероховатости. Следовательно, в файле карты могут присутствовать три типа линий:

- только контурная линия, то есть линия, проведенная через точки, расположенные на одной и той же высоте выше уровня моря. Возвышение ( $z$ ) дается в метрах;
- только линия шероховатости, то есть линия, отделяющая области различных длин шероховатости. Этот тип линии описан двумя параметрами: длина шероховатости слева  $z_{0l}$  и длина шероховатости на правой стороне  $z_{0r}$  линии. Длины шероховатости даются в метрах;
- комбинированная линия, то есть линия, которая является и контурной линией и линией шероховатости (например береговая линия). Эти линии имеют три параметра: длина шероховатости слева  $z_{0l}$ , длина шероховатости справа  $z_{0r}$ , и возвышение линии  $z$  – все значения даются в метрах.

Классификация шероховатости и оцифровка карт должны быть предпочтительно проведены для площади, простирающейся, по крайней мере, на 10 км от исследуемого участка. Если в области встречаются обширные водные поверхности, площадь может даже быть расширена на 15 км или больше.

Для классификации длины шероховатости и подготовки карты шероховатости используются топографические карты в масштабе 1:25000 или 1:50000. Описания линии изменения шероховатости вблизи к исследуемому участку (в пределах примерно 1 км) должны быть детализированы и точны, насколько возможно. На удалении от участка,



требования к деталям и точности могут быть смягчены. Очень важно, чтобы карта шероховатости обеспечивала последовательную и согласованную картину различных областей шероховатости (рисунок В.6).

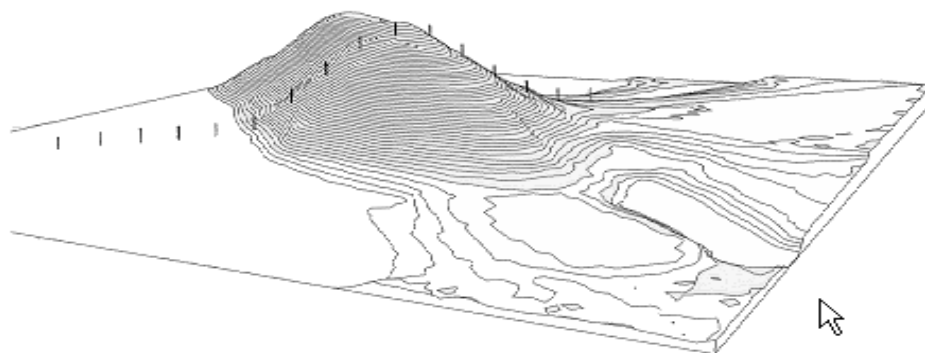


Рисунок В.6 – топографическая карта с изолиниями высоты

При рассмотрении конкретной предполагаемой площадки размещения ВЭУ необходимо учитывать эффект влияния на поток изменений высоты рельефа вокруг площадки. Для этого необходимо знать высоту ландшафта в каждой точке сетки или контурные линии (линии, представляющие равное возвышение), которые присутствуют на стандартных топографических картах. Воздушный поток над идеализированным холмом, с профилями ветра у подножия и на вершине, показан на рисунке В.7.

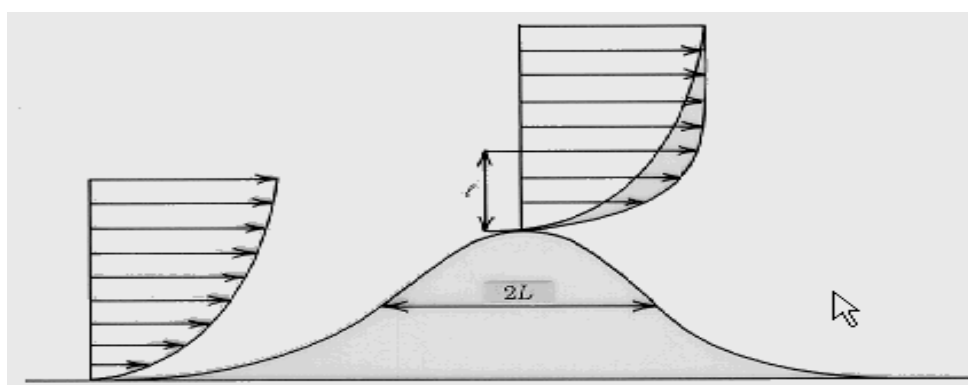


Рисунок В.7 – Вид профиля скорости при обтекании препятствия

Два масштаба длины, характеризующие поток, обозначены так:  $L$  – характерная длина холма (здесь – половина ширины в середине холма);  $I$  – высота максимального относительного увеличения скорости.

Холмы оказывают сильное влияние на ветровой поток: так 5% увеличение высоты в ландшафте может иметь 5%-ое воздействие на среднюю скорость ветра на уровне оси ветроротора ВЭУ, что приведет к 15%-ому увеличению доступной мощности.

Для определения включения препятствия (здания, сооружения) в ландшафт как экранирующее препятствие или как элементы шероховатости, могут быть применены следующие оценки:

- если точка измерений (анемометр или ось ветроротора ВЭУ) ближе, чем примерно 50 высот препятствия к препятствию и ближе чем примерно 3 высоты препятствия к поверхности земли, объект должен быть включен как препятствие. В этом случае препятствие нельзя в то же самое время рассматривать как элемент шероховатости;

- если точка измерений дальше, чем примерно 50 высот препятствия или выше, чем примерно 3 высоты препятствия, объект должен наиболее вероятно быть включен в описание шероховатости.

## **ТКП 17.10-39-2012**

Большинство анемометров (анеморумбометров) установлено на стандартной высоте 10 м. и часто недалеко от зданий – эффект экранирования имеет место и должен быть учтен при анализе данных ветра. Ось ветроротора ВЭУ, как правило, расположена на высоте свыше 40–50 м и далеко от зданий – эффекты экранирования будут иметь место крайне редко.

**Библиография**

- [1] Закон Республики Беларусь «О гидрометеорологической деятельности» от 9 января 2006 г. № 93–З
- [2] Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка ветроэнергетических ресурсов и разработка рекомендаций по выбору мест размещения ветроэнергетических установок на территории Республики Беларусь» Государственной научно-технической программы «Экологическая безопасность». Минск, 2010 г. – 359 с. УДК 551.55. № госрегистрации 20100024.
- [3] Лаврентьев Н.А. «Ветроэнергоресурсы и условия возведения ветроэнергетических установок на территории Восточной Прибалтийско-Черноморской зоны Европы», Минск, «Право и экономика» – 453 с.
- [4] Воздушный кодекс Республики Беларусь от 16 мая 2006 г. №117-З
- [5] Правила использования воздушного пространства Республики Беларусь. Утверждены Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 4 ноября 2006 г. № 1471
- [6] Макет Атласа ветров Республики Беларусь. Приложение к Отчету о научно-исследовательской работе «Оценка ветроэнергетических ресурсов и разработка рекомендаций по выбору мест размещения ветроэнергетических установок на территории Республики Беларусь» Государственной научно-технической программы «Экологическая безопасность». Минск, 2010 г. – 359 с. УДК 551.55. № госрегистрации 20100024.
- [7] Атлас ветров России. Москва, 2000 – 560 с.