

31.6я7
М 54

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

ресурсов
возобновляемых
источников
энергии



учебное
пособие для вузов

СА-314280

68-314280
АДК 620.92
БКК 31
М 242

Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии

учебное пособие для вузов

Под редакцией В.И.Виссарионова

Допущено Учебно-методическим объединением
вузов России по образованию
в области энергетики и электротехники
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению "Электроэнергетика"

Второе издание, стереотипное

Москва
Издательский дом МЭИ
2009

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ
"ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
им. Н. К. КРУПСКОЙ"

ca-314280

4

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 5 |
| Основные условные обозначения | 6 |
| Глава 1. Методы расчета ресурсов малой гидроэнергетики..... | 10 |
| 1.1. Методика расчета валового гидроэнергетического потенциала естественных водотоков | 10 |
| 1.2. Методика расчета технико-экологического потенциала малой гидроэнергетики для естественных водотоков..... | 19 |
| 1.3. Методика расчета валового и технико-экологического потенциалов малой гидроэнергетики для искусственных и водохозяйственных систем | 28 |
| 1.4. Эколого-экономический потенциал малой гидроэнергетики..... | 37 |
| Глава 2. Методы расчета ресурсов ветроэнергетики | 39 |
| 2.1. Методы расчета валовых ресурсов при наличии полной информации в точке A и для территории площадью S | 39 |
| 2.2. Методы расчета валовых ресурсов при ограниченном объеме исходной информации в точке A и для территории площадью S | 41 |
| 2.3. Типы и конструкции ветроэнергетических установок | 43 |
| 2.4. Методы расчета технических ресурсов при наличии полной информации в точке A и для территории площадью S | 48 |
| 2.5. Основные энергетические параметры ветроэнергетической станции | 56 |
| 2.6. Методы расчета технических ресурсов при ограниченном объеме исходной информации в точке A и для территории площадью S | 61 |
| 2.7. Методы расчета экономических ресурсов в точке A и для территории площадью S | 64 |
| Глава 3. Методы расчета ресурсов солнечной энергетики | 71 |
| 3.1. Методы расчета валовых ресурсов в точке A и для заданной территории площадью S на горизонтальной ПП при наличии полной информации..... | 71 |
| 3.2. Методы расчета валовых ресурсов в точке A и для заданной территории площадью S на горизонтальной ПП при ограниченном объеме исходной информации..... | 75 |
| 3.3. Методы расчета валовых ресурсов в точке A и для заданной территории площадью S на ориентированной на юг ПП | 80 |

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕСУРСОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

2.1. Методы расчета валовых ресурсов при наличии полной информации в точке А и для территории площадью S

В основе ветроэнергетических расчетов лежат данные о ветровом режиме региона. Подобные данные могут быть получены в зависимости от расположения точки земной поверхности, для которой производится расчет, в результате непосредственных многолетних наблюдений за ветром на близлежащих метеорологических станциях (метеостанциях) или с помощью различных методов, позволяющих восстановить характеристики ветра на основе результатов наблюдений на метеостанциях, расположенных в сравнимых условиях, либо интерполяцией характеристик ветрового режима.

Данные наблюдений за ветровым режимом обычно содержат следующую информацию:

- параметры расположения станции (географические координаты, высоту метеостанции над уровнем моря, открытость флюгера по различным направлениям);

- ветровые характеристики (информацию о распределении вероятности ветра по восьми направлениям в процентах, а также данные о вероятности штиля для 12 мес и средней за весь год);

- среднемесячные (для 12 мес) и среднегодовые скорости ветра в метрах в секунду;

- распределение ветра по различным градациям скорости в процентах для 12 мес и среднее за весь год;

- срочные данные по ветровым характеристикам метеостанции.

Вся информация о распределении ветра обычно приводится к высоте флюгера, равной 10 м, и усредняется по ряду значений и по срокам.

Энергия воздушного потока, Дж, с площадью поперечного сечения F составляет

$$\mathcal{E}_{в.п} = 0,5mv^2. \quad (2.1)$$

Поскольку секундная масса воздуха, кг/с, протекающая со скоростью v через это сечение,

$$m = \rho F v, \quad (2.2)$$

мощность воздушного потока, Вт,

$$N_{в.п} = 0,5 \rho F v^3, \quad (2.3)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³, $\rho_0 = 1,226$ кг/м³ при нормальных условиях $t = 15$ °С и $p = 101,3$ кПа или 760 мм рт. ст.

Для сравнительной оценки потенциальных возможностей ветроэнергетики в том или ином районе определяют удельную мощность и энергию воздушного потока [т.е. теоретический (валовой) потенциал ветроэнергетики].

Удельная мощность воздушного потока, Вт/м², равна энергии, переносимой ветром в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной скорости ветра:

$$N_{в.п}^{уд} (v(t)) = 0,5 \rho v(t)^3, \quad (2.4)$$

тогда удельная энергия воздушного потока (валовой потенциал), Вт · ч/м², за период времени T будет определяться по выражению:

$$\mathcal{E}_{в.п}^{уд} (T) = \int_0^T N_{в.п}^{уд} (v(t)) dt = 0,5 \rho \int_0^T v(t)^3 dt. \quad (2.5)$$

Кинетическая энергия, которой потенциально обладает воздушный поток, зависит не только от скорости ветра, но и от температуры воздуха и атмосферного давления (рис. 2.1 и 2.2).



Рис. 2.1. Влияние высоты местности над уровнем моря на плотность и энергию воздушного потока

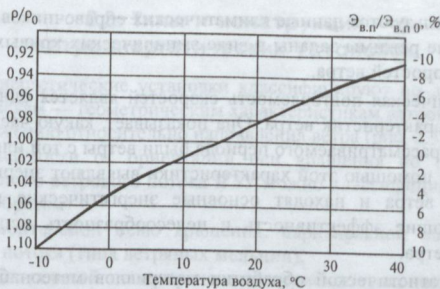


Рис. 2.2. Влияние температуры воздуха на плотность и энергию воздушного потока

По отношению к нормальным условиям ($t = 15\text{ °C}$ и $p = 101,3\text{ кПа}$, или 760 мм рт. ст.) изменение температуры воздуха от $+15$ до 0 °C повышает мощность потока примерно на 6% , а при $t = +30\text{ °C}$ энергия потока, наоборот, снижается на 5% . При постоянной температуре воздуха 0 °C изменение атмосферного давления, например, от $103,7$ до $97,3\text{ кПа}$ (от 770 до 730 мм рт. ст.) снижает энергию потока примерно на 6% .

Валовой удельный потенциал ветроэнергетики, $\text{кВт} \cdot \text{ч}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, в районе точки A территории площадью $S, \text{км}^2$, при условии, что все ВЭУ размещены одна под другой на расстоянии в $20H_6$ (H_6 — высота башни ВЭУ, м), рассчитывается обычно по формуле

$$\mathcal{E}_S^{\text{вал}}(T) = (1/20)\mathcal{E}_{\text{в.п.}}^{\text{уд}}(T)S \cdot 10^3. \quad (2.6)$$

Для территории России в среднем валовой удельный потенциал ветроэнергетики составляет $75 \cdot 10^6\text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

2.2. Методы расчета валовых ресурсов при ограниченном объеме исходной информации в точке A и для территории площадью S

В связи с отсутствием или ограниченностью основной исходной информации (многолетних наблюдений за скоростями ветра) для произвольной точки территории России (для получения надежных результатов, особенно для автономных потребителей энергии, требуется ряд часовых наблюдений за ветром в рассматриваемом районе в течение не менее 10 лет) при проведении ветроэнергетических рас-

четов используются данные климатических справочников, в которых скоростные режимы заданы в виде эмпирических кривых повторяемости скоростей ветра.

Эмпирическая повторяемость скоростей является одной из важнейших характеристик ветра. Она показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода были ветры с той или иной скоростью. С помощью этой характеристики выявляют энергетическую ценность ветра и находят основные энергетические показатели, определяющие эффективность и целесообразность использования энергии ветра.

Для статистической обработки материалов метеонаблюдений и получения эмпирической дифференциальной повторяемости скоростей ветра используется известное выражение

$$t_i(\Delta v_i) = m_i/n, \quad (2.7)$$

где t_i — повторяемость скоростей в i -м интервале скорости (градации) Δv_i ; m_i — число измерений скорости, приходящихся на i -й интервал; n — общее число измерений скорости за рассматриваемый период времени.

Стандартные градации скорости $\Delta v_i = v_i^{\max} - v_i^{\min}$ (по результатам исследований Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова) имеют 15 интервалов со следующими значениями: 0—1, 2—3, ..., ..., 16—17, 18—20, 21—24, 25—28, 29—34, 35—40 и более 40 м/с.

Необходимо заметить, что границы стандартных градаций соответствуют средним скоростям ветра между смежными диапазонами скоростей, т.е., например, в градацию 8—9 м/с попадают скорости в диапазоне $7,5 < v \leq 9,5$ м/с и т.д.

Валовой потенциал в точке A на базе эмпирической кривой повторяемости скоростей ветра, Вт \cdot ч/м², определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{в.п.}}^{\text{уд}}(T) = \frac{T}{2} \rho \sum_{i=1}^{n_{\text{град}}} \bar{v}_i^3 t_i(\Delta v_i), \quad (2.8)$$

где T — период наблюдения, ч; \bar{v}_i — средняя скорость i -й градации (интервала), м/с; $t_i(\Delta v_i)$ — повторяемость скоростей ветра в диапазоне Δv_i ; $n_{\text{град}}$ — число градаций (интервалов).

Валовой удельный потенциал ветроэнергетики в районе точки A территории площадью S , км², при ограниченном объеме исходной информации рассчитывают по (2.6).

2.3. Типы и конструкции ветроэнергетических установок

Ветроэнергетические установки классифицируют по двум основным признакам — геометрическим характеристикам ветроколеса (ВК) и его положению относительно направления ветра (рис. 2.3).

В зависимости от ориентации оси вращения по отношению к направлению ветрового потока ВЭУ можно классифицировать следующим образом:

с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветрового потока (типа ветряных мельниц);

с горизонтальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра (типа водяного колеса);

с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветрового потока.

По мощности ВЭУ условно делят на установки малой мощности (до 100 кВт), средней мощности (100—1000 кВт), мегаваттного класса (от 1 МВт и выше).

По областям применения или по назначению ВЭУ можно разделить на три группы установок, работающих:

автономно;

параллельно с источниками энергии соизмеримой мощности;

параллельно с мощной энергосистемой.

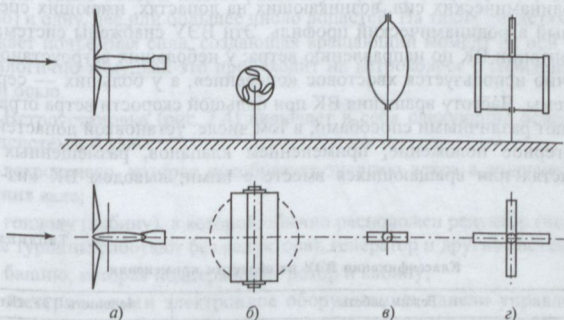


Рис. 2.3. Типы ветроэнергетических установок:

а — с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветра; б — с горизонтальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра; в — с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра (ротор Дарье); г — вертикальная двухъярусная двухлопастная (ВДЦ)

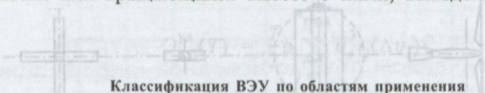
Области применения ВЭУ различны, поэтому различаются как принципы их использования, так и способы управления.

Если основное назначение ВЭУ первой группы — снабжение электроэнергией автономного потребителя или выполнение какой-либо механической работы (насос), второй группы — обеспечение бесперебойного питания потребителя энергии и экономия топлива (дизель) либо аккумулирование энергии, то установок третьей группы — обеспечение максимально возможной мощности сети при сохранении устойчивой работы ветроагрегата (табл. 2.1).

Для ВЭУ всех назначений широкое применение получили как синхронные, так и асинхронные генераторы. При этом для автономных и работающих параллельно с источниками соизмеримой мощности ВЭУ асинхронные генераторы снабжаются системами самовозбуждения. Синхронные генераторы могут быть различного типа, но, как правило, являются бесконтактными.

В настоящее время наибольшее распространение получили промышленные ВЭУ двух основных типов: с горизонтальной осью вращения — трехлопастные с горизонтально-осевой турбиной (ветроколесом); с вертикальной осью вращения — с вертикально-осевой турбиной (ротором).

Ветроэнергетические установки первого типа выполняются в виде ветроколеса с различным числом лопастей (1—12 и более), расположенных по радиусам и под некоторым углом к плоскости вращения. Рабочий момент на ветроколесе создается под действием аэродинамических сил, возникающих на лопастях, имеющих специальный аэродинамический профиль. Эти ВЭУ снабжены системами ориентации ВК по направлению ветра: у небольших ветроустановок обычно используется хвостовое «оперение», а у больших — сервосистемы. Частоту вращения ВК при большой скорости ветра ограничивают различными способами, в том числе: установкой лопастей во флюгерное положение; применением клапанов, размещенных на лопастях или вращающихся вместе с ними; выводом ВК «из-под


Таблица 2.1

Классификация ВЭУ по областям применения

| Режим работы | Мощность ВЭУ, кВт |
|---|-------------------|
| Автономная работа | Менее 20 |
| Параллельная работа с источниками соизмеримой мощности (дизель-генераторы, малые ГЭС и др.) | Менее 250 |
| Параллельная работа с мощной электроэнергетической системой | Боле 250 |

ветра» с помощью бокового плана, расположенного параллельно плоскости вращения ВК.

Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения (роторы) имеют важные преимущества по сравнению с крыльчатым ветроколесом с горизонтальной осью, так как для них отпадает необходимость в использовании устройств для ориентации относительно направления ветра. Кроме того, упрощаются их конструкция и монтаж, более удобным становится расположение генератора и редуктора, что важно при эксплуатации. Снижаются также дополнительные напряжения в лопастях, системе передач и других элементах крыльчатых установок, вызванные гироскопическими нагрузками.

Основные недостатки, препятствующие широкому внедрению ВЭУ с вертикальной осью вращения, следующие: гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих автоколебательных процессов; большая пульсация момента, приводящая к пульсации основных параметров энергии (напряжения, мощности и др.).

Существует много типов ветроколес с вертикальной осью, но для энергетики наиболее перспективным является ротор Дарье. Такой ротор образуется двумя, тремя и четырьмя изогнутыми в вертикальной плоскости лопастями, имеющими в поперечном сечении профиль крыла. Ротор имеет сравнительно небольшой начальный момент, но большую быстроходность, следовательно, относительно большую удельную мощность, отнесенную к его массе или стоимости. Такие роторы имеют различную форму (Ф-, Δ -, \diamond -, Y-образную) и одну, две или большее число лопастей. На таких лопастях возникает подъемная сила, создающая вращающий момент на оси ВЭУ аналогично тому, как это происходит на ветроколесе с горизонтальной осью.

Ветроустановка (рис. 2.4) включает в себя следующие основные подсистемы и узлы:

ветроколесо, которое преобразует энергию ветра в энергию вращения вала;

гондолу (кабину), в которой обычно расположен редуктор (некоторые турбины работают без редуктора), генератор и другие системы;

башню, которая поддерживает ротор и кабину;

электрическое и электронное оборудование: панели управления, электрические кабели, оборудование заземления и оборудование для подключения к сети, систему молниезащиты и др.

Диаметр ветроколеса ВЭУ по мере возрастания ее мощности от 1 до 3000 кВт увеличивается от 2 до 100 м, в то же время высота башни повышается от 8 до 100 м (рис. 2.5—2.8). За последние 5 лет в мире

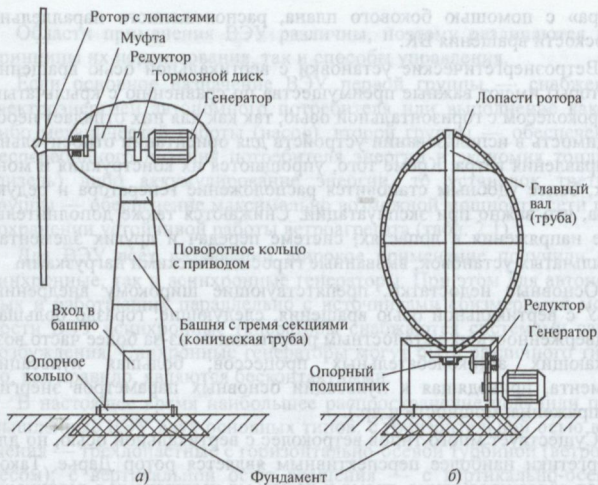


Рис. 2.4. Принципиальная схема устройства ВЭУ:

a — с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветра; *б* — с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ветра (ротор Дарье)

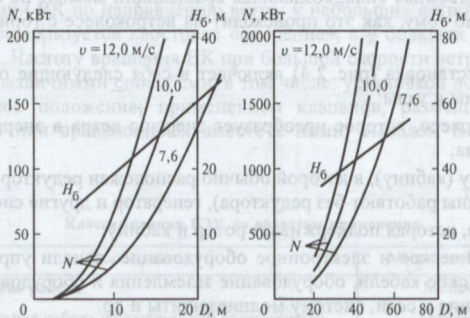


Рис. 2.5. Мощность N и высота башни H_b крыльчатой ВЭУ в зависимости от диаметра ветроколеса D

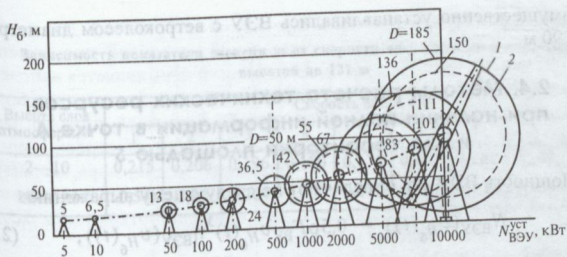


Рис. 2.6. Характеристики типового семейства ВЭУ с горизонтальной осью вращения при среднегодовой скорости ветра 7,6 м/с:

1 — на территории, удаленной от побережья; 2 — на побережье

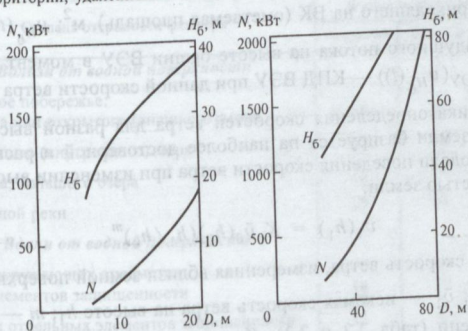


Рис. 2.7. Мощность N и высота башни H_6 в зависимости от диаметра ротора Дарье D

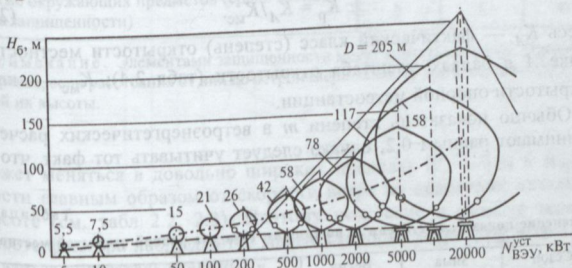


Рис. 2.8. Характеристики типового семейства роторов Дарье с вертикальной осью вращения при среднегодовой скорости ветра 7,6 м/с

преимущественно устанавливались ВЭУ с ветроколесом диаметром 60—90 м.