

**А. М. БАКШТАНИН
Т. И. МАТВЕЕВА
С. А. СОКОЛОВА**

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Учебное пособие рекомендуется научно-методическим советом
по Природообустройству и водопользованию для использования в учебном
процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям
20.03.02 и 20.04.02 Природообустройство и водопользование*

Москва
2020

УДК 621.311.24.001.24 (075.8)

ББК 31

Б 199

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственное водоснабжение, водоотведение, насосов и насосных станций» ФГБОУ ВО «РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева», Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А. Н. Костякова **М. С. Али**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий ФГБНУ ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова **Лентяева Е. А.**

Бакштанин А. М., Матвеева Т. И., Соколова С. А.

Б 199 Расчет основных энергетических и конструктивных параметров ветроэлектрической установки: учебное пособие / А. М. Бакштанин, Т. И. Матвеева, С. А. Соколова / ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева. – М. : ООО «Мегаполис», 2020. – 71 с.

ISBN 978-5-6044861-5-3

В учебном пособии рассмотрены вопросы, связанные с расчетами основных энергетических и конструктивных параметров ветроэлектрической установки (ВЭУ) малой (до 100 кВт) мощности для случая, когда электрической энергией снабжается изолированный потребитель. Обязательным считается условие бесперебойного обеспечения потребителя электрической энергией, в связи с чем ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой (ДЭС).

Учебное пособие предназначено для выполнения технических расчетов при подготовке соответствующих разделов дипломного проекта или курсовой работы в рамках дисциплин расчетно-графической работы в рамках дисциплин «Энергокомплексы на возобновляемые источники энергии» и «Возобновляемые источники энергии».

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.03.02 Природообустройство и водопользование.

УДК 621.311.24.001.24 (075.8)

ББК 31

ISBN 978-5-6044861-5-3

© Коллектив авторов, 2020

© ООО «Мегаполис», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Все известные источники энергии, используемые человечеством для выработки электрической, тепловой и механической энергии принято делить на два класса: *традиционные* (истощаемые или не возобновляемые) и *альтернативные* (возобновляемые, или не истощаемые) [1, 8, 9],

К традиционным источникам энергии относится уголь, нефть, газ. Характерной особенностью таких источников является, во-первых, их главенствующая роль в структуре мирового энергетического баланса (около 90 %), во-вторых, образование значительных объемов загрязняющих веществ в процессе использования в качестве сырья для получения энергии и, в-третьих, общая ограниченность разведанных запасов.

С учетом перспектив развития мировой экономики в ближайшие десятилетия устойчивое развитие энергетики в мировом масштабе, включая и энергетику России, может быть обеспечено лишь при условии постепенного замещения ископаемых топлив другими источниками энергии, то есть альтернативными. Поэтому соответствующую область энергетики называют *альтернативной* [8].

Альтернативная энергетика – собирательное понятие для нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ). К таким источникам принято относить солнечную, геотермальную, ветровую и гидроэнергию, а также биомассу, температурный градиент Мирового океана, приливную и волновую энергию.

Потенциал НВИЭ огромен. Например, солнечное тепло, поступающее на Землю, почти в 20 тыс. раз превышает годовое потребление энергии всем человечеством.

Значительным энергетическим потенциалом обладает Россия, включая энергию ветра. В Российском национальном докладе «Использование возобновляемых источников энергии в России» (1996), а также в [4, 6], приводятся следующие данные о потенциале энергии ветра (числитель – ПДж/год, знаменатель – млн т у.т./год).

Таблица 1 – Потенциал энергии ветра

ВИЭ	Валовой потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал
Ветровая энергия	$\frac{780 \times 10^3}{26 \times 10^3}$	$\frac{60 \times 10^3}{2000}$	$\frac{300}{10}$

По данным Министерства образования и науки РФ, для России [15] валовой потенциал энергии ветра составляет 26×10^9 т у.т./год, технический – 53×10^6 у.т./год и экономический – $10,5 \times 10^6$ т у.т./год.

При оценке ресурсов принято различать:

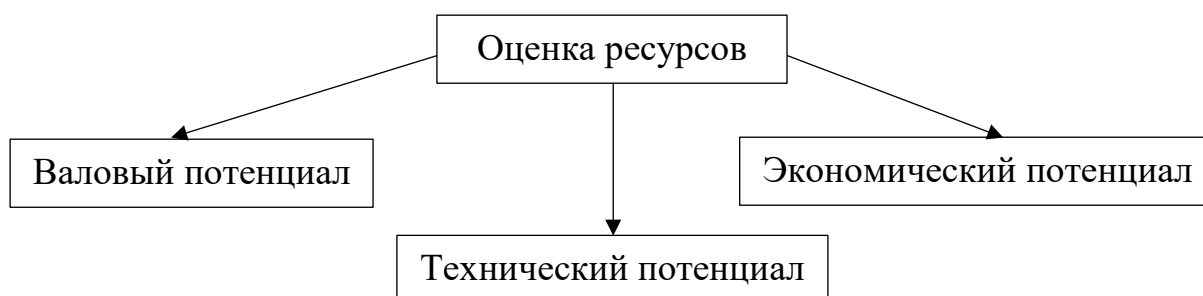


Рисунок 1 – Схема оценки ресурсов

Валовой потенциал является оценкой суммарной энергии, заключенной в данном виде ресурса.

Технический потенциал характеризует количество энергии, которое можно извлечь из ресурса при существующем уровне науки и техники.

Экономический потенциал характеризует количество энергии, получение которой из данного вида ресурса экономически оправданно при сложившемся уровне затрат.

Потенциал различных видов энергоресурсов обычно оценивается в миллионах тонн условного топлива (млн т у.т.). Под *условным топливом* понимается принятая в технико-экономических расчетах единица, служащая для сопоставления тепловой ценности различных видов органического топлива. В качестве единицы условного топлива принимается 1 кг твердого или 1 м³ газообразного топлива, имеющего теплоту сгорания 29,2 МДж или 7000 ккал. Другими словами, 1 кг условного соответствует количеству тепла, выделяемому при сгорании 1 кг высококачественного угля. При этом следует иметь в виду, что 1 т у.т. = 29,3 ГДж = 0,7 т н.э. – нефтяной эквивалент.

В данном учебном пособии рассматриваются вопросы использования энергии ветра для выработки электрической энергии, кото-

рая поставляется изолированному потребителю, то есть потребителю, находящемуся вдали от сетей централизованного энергосбережения. Обычно под изолированным потребителем понимается одно или несколько хозяйств, в том числе фермерских, небольшой поселок, предприятие или группа таких предприятий, удаленных от энергосистем регионального или федерального значения. Следует иметь в виду, что подключение к сетям централизованного электроснабжения стоит достаточно дорого. Так, например, по данным последних исследований, стоимость прокладки низковольтной ЛЭП для различных регионов России составляет от 300 до 500 тыс. руб. за 1 км, а подключение к сетям централизованного электроснабжения в Московской области превышает 700 000 руб. за каждый киловатт установленной мощности.

Для снабжения электрической энергией изолированного потребителя согласно тематике учебного пособия, предусматривается сооружение ветроэлектрической установки (ВЭУ) малой (до 100 кВт) мощности. При этом предполагается, что ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой (ДЭС) а целях бесперебойного обеспечения электроэнергией потребителя в периоды безветрия или малых скоростей ветра, недостаточных для включения ВЭУ в работу.

В качестве альтернативного источника энергии рассматривается энергоустановка с аналогичными энергетическими характеристиками (по мощности и количеству вырабатываемой электроэнергии), работающая на углеводном топливе (например, паротурбинная ТЭС). Так как мощность ТЭС (даже относительно малой мощности) обычно превосходит потребности изолированного потребителя, для сопоставимости результатов технико-экономических расчетов условно принимается, что в расчетах можно учитывать лишь ту часть энергии, которая поступает от ТЭС непосредственно для покрытия изолированного потребителя. Такой подход обеспечивает сопоставимость различных видов энергоустановок при выполнении расчетов сравнительной экономической эффективности их устройства для целей энергоснабжения потребителя.

В связи с этими в учебном пособии дается обоснование и порядок расчета главных энергетических и конструктивных параметров ВЭУ (+ДЭС) с оценкой экономической эффективности устройства такой комбинированной установки в сравнении с традиционной установкой, в качестве которой принимается паротурбинная ТЭС.

Оценка экономической эффективности использования ВЭУ (+ДЭС) как источника электроснабжения изолированного потребителя основана на статическом методе, широко применяемом при оценке эффективности инвестиционных проектов [12, 13].

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРА ДЛЯ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ И БЫТОВЫХ ЦЕЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

1.1. Общая характеристика использования энергии ветра

Ветроэнергетика – отрасль энергетики, связанная с разработкой теоретических основ, методов и технических основ, методов и технических средств с целью преобразования энергии ветра в механическую, тепловую или электрическую энергию и определяющая области и масштабы целесообразного использования ветровой энергии.

Для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую или механическую используются ветроэнергетические установки. Вырабатываемая такой установкой энергия используется для бытовых или промышленных нужд, механическая энергия преимущественно для подъема воды в условиях сельской местности.

В общем случае ветроэнергетическая установка представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, который предназначен для преобразования энергии ветра в другие виды энергии [11].

Если установка создается для целей получения электрической энергии, то в ее состав обязательно входит система генерирования электроэнергии. Поэтому в дальнейшем в качестве энергетической установки будет рассматриваться ветроэлектрическая установка (ВЭУ), предназначенная только для выработки электрической энергии.

ВЭУ классифицируется по двум основным признакам:

- положению ветроколеса (ВК) или ротора относительно

направления ветра;

- геометрии ветроколеса (ВК или ротора).

По отношению направления ветра ВЭУ делятся на установки с горизонтальной или с вертикальной осью вращения. Наибольшее распространение получили ВЭУ с горизонтальной осью вращения (более 95 % парка ВЭУ).

В установках с горизонтальной осью обычно применяются двух- и трехлопастные ВК – они отличаются плавным ходом вращения ВК, что позволяет их использовать для выработки электроэнергии.

ВЭУ с горизонтальной осью вращения состоит из следующих основных подсистем и узлов (рисунок 2):

- *ветроколеса* (или ротора);
- *кабины* (или гондолы), в которой обычно расположен редуктор, генератор и другие системы;
- *башины*, на которой крепится ветроколесо и кабина;
- *электрического и электронного оборудования*.

Согласно ГОСТ Р 51237–98 главным элементом ВЭУ является ветроагрегат (ВА). В свою очередь, ветроагрегат (ВА) рассматривается как система, состоящая из ветродвигателя (ВД), системы передачи мощности и проводимой ими в движение электромашинного генератора.

Ветродвигатель ВД – устройство для преобразования ветровой энергии в механическую энергию вращения ветроколеса (ВК), ВК – основной элемент ВД.

Система передачи мощности – комплекс устройства для передачи мощности от вала ВК к валу электрогенератора с повышением (мультипликатор) или без повышения частоты вращения вала этой машины – электромашинный генератор и комплекс устройств: преобразователь, аккумулятор и т. д., дополненная панелями управления, электрическими кабелями, системой заземления, оборудованием для подключения в сети – позволяет ВЭУ обеспечивать энергией потребителя.

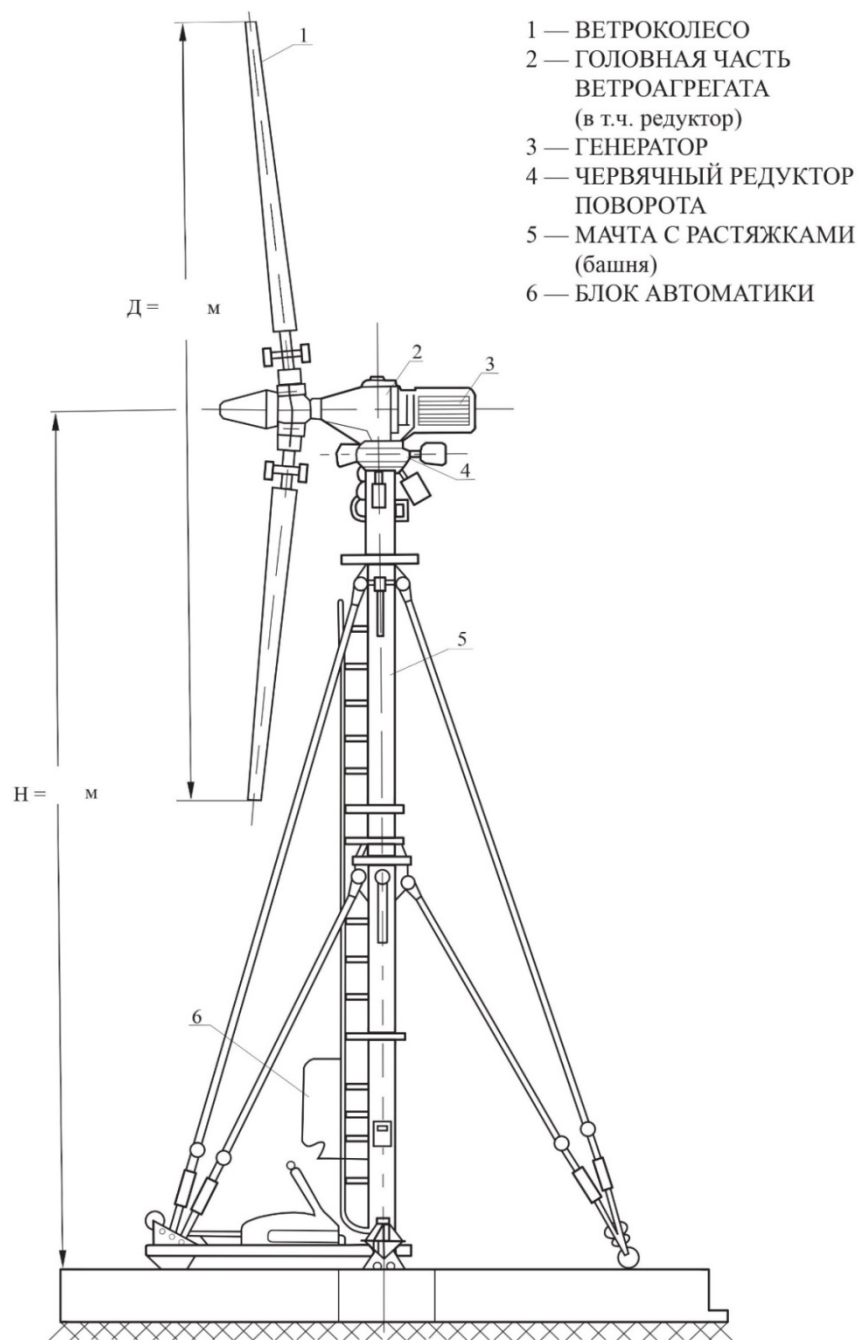


Рисунок 2 – Схема ветроэлектрической установки (ВЭУ)

Очевидно, что количество и режим выработки электроэнергии ВЭУ с учетом места ее установки зависит от энергетических характеристик ветра и конструкции ВА.

В зависимости от характера использования электрической энергии, вырабатываемой ВЭУ, различают:

1. Ветроэнергетические станции (ВЭС).

2. Малые ветроэнергетические системы.

3. Комбинированные ветроэнергетические системы.

Ветроэнергетические станции (ВЭС) – ВЭУ объединяются в группы, например, по 50 и более установок, образуя так называемые «ветровые поля». Применение ВЭУ в составе ВЭС экономически более выгодно. Мощность ВЭС колеблется от сотен кВт до сотен МВт ВЭС может работать только в составе энергосистемы.

Малые ветроэнергетические системы – это ВЭУ мощностью от 40 Вт до 10 кВт, дополненные аккумулятором и устройством по защите и управлению разряд-зарядом аккумулятора. Такие системы предназначены для различных целей – от зарядки автомобильного аккумулятора до снабжения энергией фермерского хозяйства или электрического освещения нескольких домов.

Комбинированные ветроэнергетические системы представляют собой сочетание ВЭУ с другим самостоятельным источником электроэнергии. Наибольшее распространение получили системы:

ВЭУ+ фотоэлектрическая батарея + аккумуляторная батарея;

ВЭУ+ микро- или малая ГЭС;

ВЭУ+ дизель-генератор + аккумуляторная батарея.

Такие системы относительно дороги, но они могут обеспечивать бесперебойное электроснабжение. Наибольшее распространение получили ВЭУ в сочетании с дизель-генераторными установками (ДЭС).

Основные недостатки применения ВЭУ:

- энергия ветра отличается существенной неустойчивостью;
- при отсутствии ветра необходим резервный источник тока;
- сравнительно высокая удельная стоимость установленной мощности.

Основные преимущества применения ВЭУ:

- не требуется традиционных видов топлива;
- предотвращается выброс CO₂ и других вредных веществ;
- незначительное отчуждение плодородных земель по сравнению с ГЭС и ТЭС;
- возможность полной автоматизации работы, отсутствие дежурного персонала;
- короткий срок от подписания контракта до ввода в эксплуатацию.

Некоторые сведения о развитии ветроэнергетике в мире приводятся в приложении 1. Если ограничиваться самым главным, то наибольшее развитие ветроэнергетика получила в Северной Америке и в Европе, в частности, в США, Дании, Германии и Испании. На долю этих стран приходится более трех четвертей всего мирового парка ВЭУ.

Использование энергии ветра в заметных для энергетического баланса ряда стран объемах началось с 80-х годов XX века.

На конец 1998 года в 10 странах-лидерах установленная мощность составляла: в Германии – 2873 МВт, США – 1819 МВт, Дании – 1380 МВт, Индии – 992 МВт, Испании – 907 МВт, Нидерландах – 359 МВт, Англии – 330 МВт, Китае – 190 МВт, Италии – 154 МВт, Швеции – 148 МВт. До 1998 года в использовании энергии ветра лидировали США, далее Германия.

Общая мощность ВЭУ в 2002 году оценивалась в размере более 2500 МВт. Ожидается, что к 2010 году мощность ВЭУ достигнет 120 ГВт.

Стоимость одного киловатта установленной мощности для современных ВЭУ, входящих в состав ВЭС, снижена примерно до 70 000 рублей, стоимость электроэнергии 2,8...3,5 руб. за 1 кВт·ч.

Стоимость одного киловатта установленной мощности для современных малых ветроэнергетических систем значительно выше – до 140 000 руб., стоимость электрической энергии до 5,6–7 руб. за 1 кВт·ч. Для обеспечения конкурентоспособности ВЭУ в странах-лидерах (Германия и др.), как правило, предусматривается льготное централизованное субсидирование поставщиков электроэнергии, использующих НВИЖ, в том числе и энергию ветра.

На начало 2000 года в России установленная мощность ВЭУ составляла 5 МВт, в 2003 году – 10 МВт.

На сегодня в России функционируют следующие ВЭС, подключенные к сетям энергосистем:

Калмыцкая ВЭС, проектная мощность 22 МВт, фактическая 1 МВт (1 ВЭУ×1 МВт), разработчик – МКБ «Радуга», изготовитель – Тушинский машиностроительный завод;

Воркутинская ВЭС, мощность 1,3 МВт (96 ВЭУ×250 кВт), разработчик × НПО «Ветроэн», изготовители – НПО «Ветроэн» и ПО «Южмаш» (Украина); проектная мощность – 2,5 МВт;

Ростовская ВЭС, мощность 0,3 МВт (10 ВЭУ×30кВт), разработчик – немецкая фирма «Хузумер Шифтсфер» с участием ПО

«Ленподъем-трансмаш» и ассоциации «Совена»;

Зеленоградская ВЭС (Калининградская область), мощность 0,625 МВт (6 ВЭУ×225кВт, 1 ВЭУ×600 кВт), поставщик оборудования и спонсор проекта - Дания;

ВЭС Тюпкельды, Башкирия, г. Октябрьский, мощность 2,2МВт (4 ВЭУ×550 кВт), поставщик оборудования и спонсор проекта – Германия;

ВЭС Южных сетей, Камчатка, п. Никольское, мощность 0,5 МВт (2 ВЭУ×250 кВт), поставщик оборудования – Дания.

В 2019 году были построены 2 крупных ветропарка ВЭС «Адыгейская» и ВЭС «Ульяновская-2». На сегодняшний момент ВЭС «Ульяновская-2» стала самой мощной в России, ее мощность составила 50,4 МВт.

По данным Института энергетики НИУ ВШЭ технический электроэнергетический потенциал ветроэнергетики составил порядка около 17 101 млрд кВт·ч/год, что на порядок выше чем 1090,9 млрд кВт·ч/год – объем электроэнергии, выработанный всеми электростанциями страны в 2018 году.

К концу 2019 года суммарная мощность ветряных электростанций России достигла 222,56 МВт.

По данным Международного агентства возобновляемой энергетики (IRENA) опубликован очередной ежегодный статистический отчет Renewable Capacity Statistics 2020.

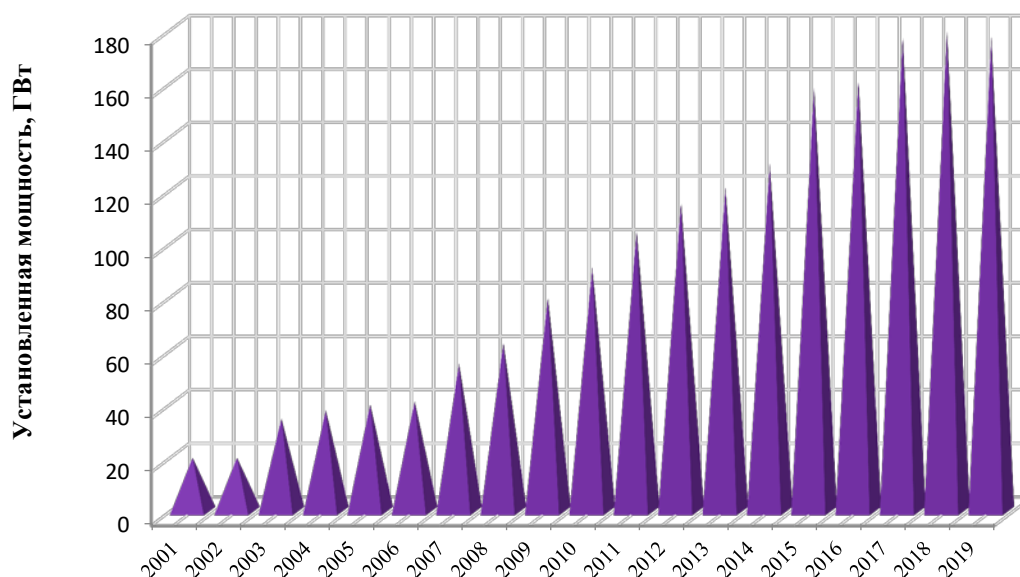


Рисунок 3 – Установленная мощность ВЭС в мире, ГВт

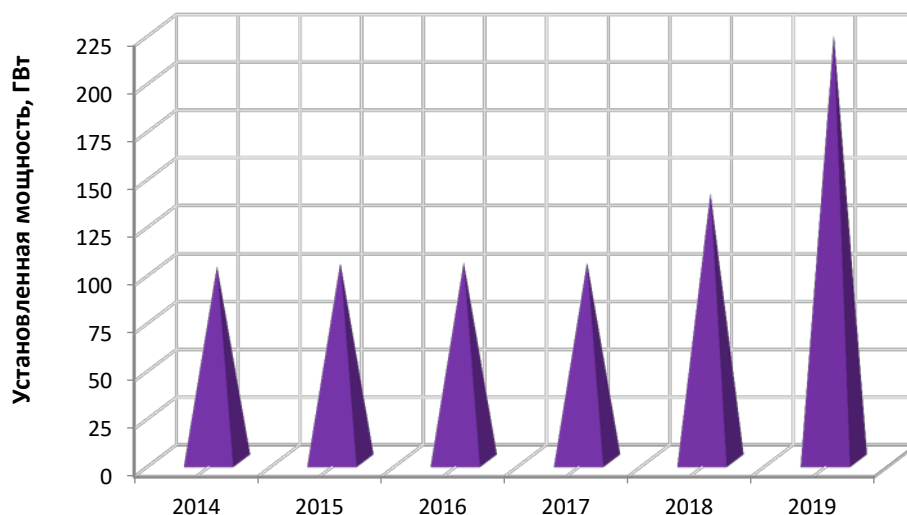


Рисунок 4 – Установленная мощность ВЭС в России, МВт
*2014 г. с учетом ВЭС Крыма

1.2. Малые и комбинированные ветроэнергетические системы как источник снабжения электрической энергией изолированного потребителя

Ветроэлектрическая установка (ВЭУ), предназначенная для обеспечения хозяйственных и бытовых нужд изолированного потребителя, состоит из нескольких основных элементов (рисунок 2): ветродвигателя (ВД) и системы генерирования электроэнергии (СГЭЭ), в которую входят электромашинный генератор и комплекс устройств (преобразователь, аккумулятор и т. д.) для подключения к потребителю со стандартными параметрами электроэнергии. Ветро-двигатель (ВД) + система передачи мощности (мультипликатор + электромашинный генератор) образуют ветроагрегат (ВА), номинальная мощность ВА (на выходных клеммах генератора) определяет установленную мощность ВЭУ.

Малая энергетическая система отличается от комбинированной отсутствием дополнительного источника энергии в виде дизель-генераторной установки, фотоэлектрической батареи, мини-ГЭС и т. п.

Напротив, комбинированная ветроэлектрическая установка, дополняется ДЭС и другими системами, изображенными на рисунок 5.

В общем случае ветроагрегат (ВА) для наиболее надежного обеспечения потребителя электроэнергией в автоматическом режиме заряжает аккумуляторную батарею (АБ). Для этого используется

стандартный выпрямитель для преобразования трехфазного напряжения в постоянный ток. АБ может использоваться для получения электропитания как на основе переменного, так и постоянного тока.

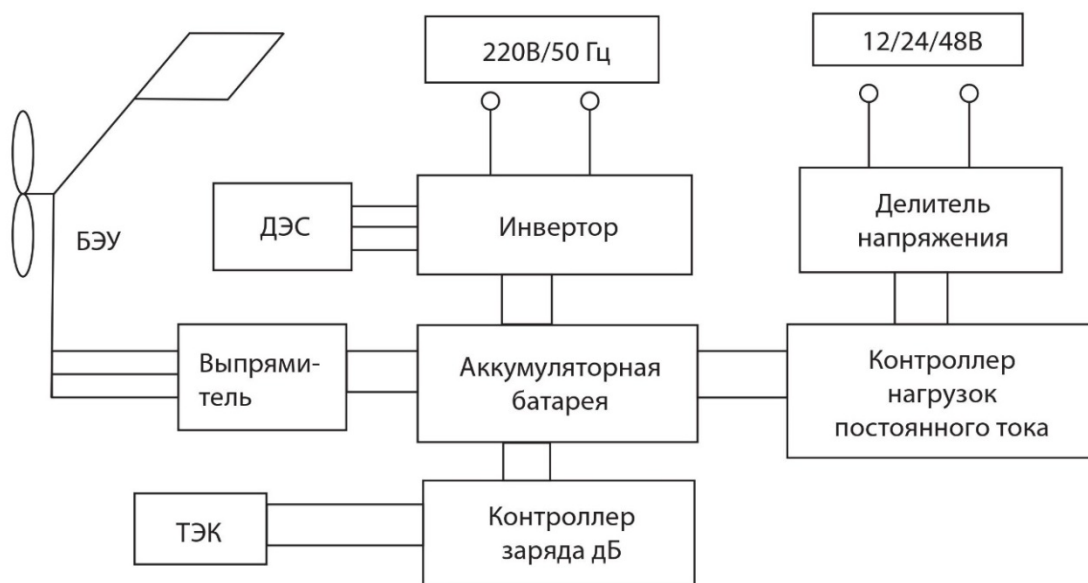


Рисунок 5 – Общая схема комбинированной ветроэлектрической установки (ВЭУ + дизельная электростанция)

В первом случае предусматривается установка инвертора, который для обслуживания потребителей стандартного напряжения преобразует энергию, запасенную в аккумуляторной батарее (АБ), а высококачественное однофазное напряжение 220В/20Гц. При этом защиту АБ от перезаряда в линии переменного тока осуществляет инвертор. Во втором случае к АБ подключаются потребители постоянного напряжения, причем для получения стандартного ряда напряжений постоянного тока (12/24/48В) устанавливаются делители напряжения. При этом контроллер заряда регулирует зарядное напряжение и тем самым предохраняет АБ от перезаряда. Избыток энергии ВА, который остается при регулировании зарядного напряжения, целесообразно использовать для хозяйственных нужд (нагрев воды бойлере или нагрев воздуха в помещении, для чего в системе предусматривается водяной или воздушный ТЭН). Для предотвращения перезаряда АБ имеется контроллер нагрузок постоянного тока. КА только батарея приближается к опасному уровню перезаряда, данный контроллер отключает нагрузки постоянного тока.

В случае длительного шторма рекомендуется иметь резервный источник энергии для заряда АБ. Наиболее распространенный случай – это дизельная электрическая станция (ДЭС), которая подключается к инвертору. При этом следует иметь в виду, что в большинство современных инверторов встроено зарядное устройство от генератора переменного тока или сети. Основные элементы, которые определяют стоимость энергоустановки (ВЭУ) – это ветроагрегат (ВА), инвертор и АБ.

Типичные бытовые нагрузки для единичного потребителя приводятся в положении 2. Инвертор ориентирован на пиковую мощность энергопотребления. Для снижения мощности инвертора следует согласовывать порядок подключения мощных электроприборов. Другой способ понизить мощность инвертора – это перевести часть нагрузок, например, освещение, на постоянное напряжение.

АБ подбирается с учетом длительности шторма, в течение которого ВА бездействует. Для снижения емкости АБ необходимо вводить в маловетренные дни экономный режим потребления энергии. Другой способ понизить емкость АБ – это использовать резервный источник энергии для перекрытия длительных штормов, например, ДЭС.

При расчете энергетических и конструктивных параметров ВЭУ в методическом пособии принимается условие бесперебойного снабжения электрической энергией изолированного потребителя. В связи с этим в качестве замещающей ВЭУ энергетической установки в периоды безветрия или малых скоростей ветра (3...4 м/с) принимается дизель-генераторная установка (ДЭС). Именно такое сочетание наблюдается в большинстве случаев на практике. Технико-экономические показатели для современных ДЭС приведены в положении 6. При подборе установленной мощности ДЭС следует принимать ее всегда выше требуемой (расчетной) мощности ВЭУ и учитывать при этом фактическое время работы ДЭС. При наличии ВЭУ общее время работы дизель-генераторной установки обычно составляет около 15 % [17, С. 35–39] в течение года. При подборе марки ДЭС следует руководствоваться каталогами и прайс-листами предприятий-производителей.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЭУ

На ветроколесо (ВК) ветроэлектрической установки (ВЭУ) воздействует ветровой поток, обладающей кинетической энергией. При этом только часть кинетической энергии ветрового потока передает ВК. Исходя из очевидных физических представлений, была получена следующая расчетная формула для вычисления мощности ветрового потока (N_0 , Вт) [1, 11]

$$N_0 = F \frac{\rho V^3}{2}, \quad (2.1)$$

где F – площадь поперечного сечения ветрового потока, м^2 ; ρ – плотность воздуха, в обычных условиях $1,225 \text{ кг/м}^3$; V – скорость ветра, м/с

Расчетная схема с целью вывода формулы для определения мощности ВК показана на рисунке 6, а, б.

Чтобы рассчитать мощность ветрового потока, необходимо, во-первых, выделить некоторый объем воздуха, взаимодействующий с ВК, которое «ометает» площадь $F_{\text{ВК}}$ (рисунок 6, а), а во-вторых, принять некоторую правдоподобную модель взаимодействия ветрового потока с ВК (рисунок 6, б). Введем следующие обозначения:

V – скорость ветра,

ρ – плотность (объемная масса) воздуха,

W_0 – площадь поперечного сечения потока воздуха на подходе к ВК (здесь скорость составляет V_0),

W_2 – площадь поперечного сечения того же потока передачи ветроколесу некоторой доли его начальной энергии (остаточная скорость V_2).

Если принять гипотезу об отсутствии турбулентности в выделенном объеме воздуха, то есть принять допущение о возможности ламинарного движения потока воздуха (рисунок б, а), то кинетическая энергия (N_0 или энергия ветрового потока) составит $N_0 = \frac{1}{2}(\rho F V) V^2$. Тем самым, согласно [1, С. 204] для определения N_0 с учетом взаимодействия ветрового потока с ВК можно записать следующее выражение

$$N_0 = \frac{1}{2} \rho F_{\text{ВК}} V_0^3. \quad (2.2)$$

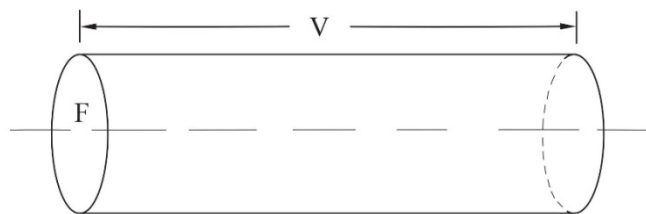
В пользу возможности такого подхода говорит тот факт, что неравномерность воздушного потока внутри него носит локальный характер по отношению к общим объемам воздуха, воздействующим на ВК.

Действующая на ВК сила Φ равна изменению количества движения массы, проходящего через него в единицу времени (m_B), можно записать

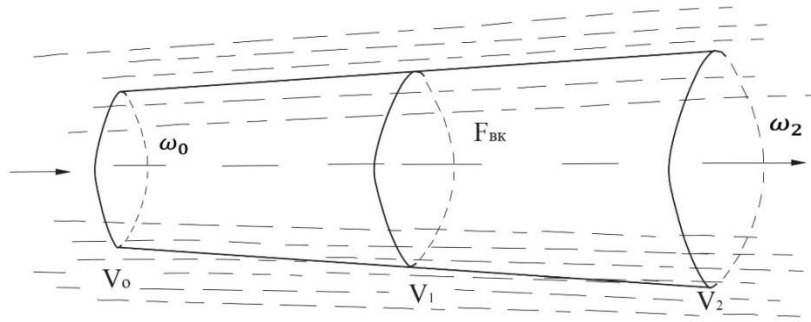
$$\Phi = m_B V_0 - m_B V_2. \quad (2.3)$$

Эта сила воздействует на ВК со стороны набегающего на него ветрового потока, которой считается однородным (турбулентность не учитывается) и имеющим скорость V_1 . Тем самым, мощность, развиваемая этой силой, то есть мощность ВК, составит

$$N = \Phi V_1 = m_B (V_0 - V_2) V_1. \quad (2.4)$$



а)



б)

Рисунок 6 – К расчету мощности ветрового потока (Дж. Твайделлу и А. Уэйру, 1990): а – масса выделенного объема воздуха ρFV кинетическая энергия $\frac{1}{2}(\rho FV)V^2$; б – модель взаимодействия ветрового потока с ветроколесом (ВК), $N_0 = \frac{1}{2}\rho F_{\text{BK}} V_0$

С другой стороны, эта мощность (N) равна энергии, теряемой ветровым потоком при взаимодействии с ВК, а именно

$$N_w = \frac{1}{2}m_B(V_0^2 - V_2^2). \quad (2.5)$$

Следовательно, можно приравнять правые части равенств (2.4) и (2.5), что приводит к выражению

$$(V_0 - V_2)V_1 = \frac{1}{2}(V_0^2 - V_2^2) = \frac{1}{2}(V_0 - V_2)(V_0 + V_2). \quad (2.6)$$

Откуда

$$V_1 = \frac{(V_0 + V_2)}{2}. \quad (2.7)$$

Из формулы (2.7) следует важный вывод о том, что скорость воздушного потока в плоскости ВК не может быть менее половины скорости набегающего потока.

Масса воздуха, проходящего через сечения F_{BK} в единицу времени, равна

$$m_B = \rho F_{\text{BK}} V_1. \quad (2.8)$$

Тогда (2.4) принимается на вид

$$N = \rho F_{\text{BK}} V_1^2 (V_0 - V_2). \quad (2.9)$$

а после замены $V_2 = 2 \times V_1 - V_0$ из (2.7) получается следующее выражение

$$N = \rho F_{\text{ВК}} V_1^2 (V_0 - (2V_1 - V_0)) = 2\rho F_{\text{ВК}} V_1^2 (V_0 - V_1). \quad (2.10)$$

Чтобы выяснить связь между (2.1) и (2.10), полезно ввести понятие коэффициент торможения потока (α), под которым понимается

$$\alpha = \frac{(V_0 - V_1)}{V_0} \quad (2.11)$$

Формулу (2.11) можно преобразовать

$$V_1 = V_0(1 - \alpha), \quad (2.12)$$

что с учетом (2.7) позволяет коэффициент α записать в виде

$$\alpha = \frac{(V_0 - V_2)}{2} V_0. \quad (2.13)$$

Если V_1 из (2.12) подставить в (2.10), то мощность ВК можно выразить как

$$N = 2\rho F (1 - \alpha)^2 V_0^2 (V_0 - (1 - \alpha)V_0) = \frac{1}{2} \rho F_{\text{ВК}} V_0^3 (4\alpha(1 - \alpha)^2). \quad (2.14)$$

Сравнивая мощность ВК по (2.14) с кинетической энергией потока воздуха по (2.2), получаем

$$N = C_p N_0, \quad (2.15)$$

где C_p – коэффициент мощности слои коэффициент использования ВК энергии ветрового потока.

Согласно формулы (2.15)

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (2.16)$$

Как показано в [1, с. 206], коэффициент C_p достигает максимального значения при $\alpha = 1/3$, то есть $C_p^{\text{max}} = 0,59$ (критерий Бетца). Следовательно, при самых благоприятных обстоятельствах ВК может использовать чуть более половины энергии набегающего потока воздуха. Если от идеализированной расчетной схемы обратиться к реальной ВЭУ, точнее к ветроагрегату (ВА), то с учетом конструктивных особенностей ВА коэффициент C_p принимает значения существенно ниже максимальной величины, например, 0,35 и выше, если иметь в виду более совершенные современные конструкции ВА (до 0,48).

Между тем, необходимо подчеркнуть, то при оценке суммарной мощности ветрового потока за длительный промежуток времени, например, за год нельзя непосредственно пользоваться средними значениями скорости ветра за тот же период ветра, так существенное значение имеет фактическое распределение скоростей ветра по сравнению с их средней величиной. Так, например, согласно анализу, многочисленных данных метеорологических наблюдений фактическое распределение скоростей ветра может быть, описано одним из известных в математической статистике законов распределения случайной величины, например, можно использовать распределение Релея или X распределение, в [14] рекомендуется использовать распределения Вейбулла. С другой стороны, нельзя забывать и том, что мощность ветрового потока зависит от куба скорости ветра, что самым существенным образом сказывается на энергетических показателях ветрового потока (например, при увеличении скорости ветра с 5 до 6 м/с производство энергии возрастет более чем 1,7 раза). Учитывая эти обстоятельства, доля вычисления мощности ветрового потока, если известна среднегодовая скорость ветра (V_{CP}), рекомендуется следующая формула [11, с. 54], которой учтен соответствующий повышающий коэффициент (около 1,91)

$$N_0 = 1,17 F_0 V_{cp}^3. \quad (2.17)$$

Современные ВЭУ в соответствии с физическими представлениями о преобразовании энергии ветрового потока в энергию ВК изначально могут использовать только часть ветровой энергии (не более 0,59 от общей энергии, критерий Бетца). Кроме этого, надо учитывать и конструктивное исполнение ВЭУ, что сказывается, например, на величине начальной (стартовой) скорости ветра (обычно 3...4 м/с), при достижении которой ВК начинает вращаться и соответственно ВА начинает вырабатывать электроэнергию. Поэтому в формулу для расчета средней развиваемой мощности ВЭУ ($N_n^{BЭУ}$ – средняя развиваемая мощность ВЭУ) вводится некий понижающий коэффициент $C_n^{BЭУ}$, с помощью которого учитываются главные факторы, определяющие реальную мощность ВЭУ. Представляется, что в данном случае под $C_p^{BЭУ}$ следует понимать фактический коэффициент использования потребителем электроэнергии с учетом местных условий и местоположения ВЭУ.

В общем случае доля расчета мощности ВЭУ с учетом условий подключения установки к энергосети изолированного потребителя можно воспользоваться следующей формулой

$$N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}} = C_p^{\text{ВЭУ}} N_0 = C_p \eta_r \eta_{\text{АБ}} \eta_{\text{ин}} \eta_p \eta_{\text{каб}} N_0, \quad (2.18)$$

где C_p – коэффициент мощности или коэффициент использования ВК энергии ветрового потока; η_r – КПД генератора; η_p – КПД редуктора; $\eta_{\text{АБ}}$ – КПД аккумуляторной батареи (АБ); $\eta_{\text{ин}}$ – КПД инвертора; $\eta_{\text{каб}}$ – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в кабеле при ее подводе от ВА к электросети потребителя; N_0 – как и ранее, мощность ветрового потока, формула (2.17), но в данном случае под (F_0) понимается «ометаемая» площадь ВК ($F_{\text{ВК}}$).

Коэффициент мощности C_p зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра (C_p от 0,35 до 0,45). В общем случае количество электроэнергии, вырабатываемой ВА, зависит от КПД генератора и редуктора, а при определении количества электроэнергии, подаваемой потребителю от ВЭУ, следует учитывать также потери энергии в подводящем кабеле, инверторе и аккумуляторной батарее (АБ). С учетом названных факторов $C_p^{\text{ВЭУ}}$ в практических расчетах может снизиться до 0,25 [11, С. 54].

Таким образом, среднюю развиваемую мощность ВЭУ ($N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$), отвечающую запросам потребителя, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$N_{\Pi} = 1,17 C_p^{\text{ВЭУ}} F_{\text{ВК}} V_{\text{ср}}^3, \quad (2.19)$$

где $F_{\text{ВК}}$ – площадь ветрового потока, «ометаемая» ВК; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость ветра за расчетный период, м/с (определяется географическим положением места установки ВЭУ).

Мощность $N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$ обычно существенно отличается от так называемой установленной мощности ВЭУ ($N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$). Под установленной мощностью $N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$ обычно понимается номинальная мощность, обеспечиваемая генератором ВА при некоторой расчетной скорости ветра (для современных ВЭУ $V_p = 7...15$ м/с). Поэтому в соответствии с формулами (1) и (3) для вычисления установленной мощности ВЭУ $N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}}$ (номинальной мощности генератора) следует использовать зависимость

$$N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} C_p \eta_r \eta_p F_{\text{ВК}} V_{\text{ср}}^3, \quad (2.20)$$

где все обозначения известны из предыдущих формул.

Установленная мощность (или номинальная мощность), обеспечиваемая генератором ($N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}}$), вычисляется для того, чтобы в соответствие с полученным результатом подобрать марку ВЭУ, которая выпускается промышленностью.

Марки ВЭУ, выпускаемые отечественной промышленностью и за рубежом, представлены в приложении 3.

В настоящем учебном пособии условно принимается, что вся электроэнергия, поступающая от ВЭУ, непосредственно подается потребителю (тем самым не учитываются потери энергии в проводящем кабеле, инверторе и аккумуляторной батарее).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЭУ

Принято различать энергетические и конструктивные параметры ВЭУ. В отличие от энергоустановок, использующих традиционное углеводное топливо, в случае выработки электроэнергии от ВЭУ, в перечень таких показателей входят параметры, характеризующие экологическую составляющую работу таких установок, а именно: количественная оценка сэкономленного органического топлива, обычно в т у. т. в год; объем предотвращенной эмиссии углекислого газа, т/год.

Для расчета энергетических и конструктивных параметров ВЭУ используются преимущественно зависимости (2.17)–(2.20), представленные в предыдущем разделе.

Кроме этого, для количественной оценки сэкономленного органического топлива ($B^{\text{ВЭУ}}$) и объема предотвращенной эмиссии углекислого газа ($V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}}$) используются следующие зависимости

$$B^{\text{ВЭУ}} = \frac{Q^{\text{ВЭУ}}}{Q_p^n \eta_{\text{ТЭС}}}, \quad (3.1)$$

где $Q^{\text{ВЭУ}}$ – количество энергии в пересчете на тепловую, которую вырабатывает ВЭУ за период t в течение года; Q_p^n – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива; $Q_p^n = 7000$ ккал/кг у.т.; $\eta_{\text{ТЭС}}$ – КПД традиционной энергоустановки

$$V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}} = 0,5 \times E_C^{\text{ВЭУ}}$$

если известно, что выработка 1 кВт·ч электрической энергии на органическом топливе в среднем сопровождается выбросом 0,5 кг CO_2 .

3.1. Основные энергетические параметры ВЭУ

К основным энергетическим параметрам ВЭУ обычно относят:

- установленную мощность ВЭУ, которая обозначается как $N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – ватты ($Вт$), киловатты ($кВт$), мегаватты ($МВт$);
- средне развиваемую мощность ВЭУ, обозначается как $N_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – ватты ($Вт$), киловатты ($кВт$), мегаватты ($МВт$);
- количество вырабатываемой электрической энергии за расчетный период времени (τ), например, за год; обозначается $E_{\text{с}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – ватт-часы ($Вт \cdot ч$), киловатт-часы ($кВт \cdot ч$), мегаватт-часы ($МВт \cdot ч$) за период t (сутки, год);
- коэффициент использования установленной мощности ВЭУ, обозначается как $K_{\text{ис}}^{\text{ВЭУ}}$, представляет собой отношение средней развиваемой мощности ВЭУ $\langle N \rangle$ (или ее математического ожидания) к установленной мощности $N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – доли ед.;
- удельная мощность ветрового потока (n_0), которую «снимает» ВК с m^2 «ометаемой» площади, обозначается как n_0 размерность – $Вт/м^2$;
- среднегодовая удельная выработка электроэнергии на $1 м^2$ «ометаемой» площади, обозначается как $e_{\text{с}}$, размерность – $кВт \cdot ч/м^2$ в год;
- годовая экономия условного топлива, обозначается как $B^{\text{ВЭУ}}$, размерность – $т у. т.$;
- объем предотвращенной эмиссии углекислого газа в атмосферу, обозначается как $V_{\text{уг}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – $т/год$.

3.2. Основные конструктивные параметры ВЭУ

Основными конструктивными параметрами ВЭУ являются:

- радиус или диаметр ветроколеса (ВК), обозначается соответственно, как R или D , размерность – $м$;
- высота башни ВЭУ, обозначается как H , размерность – $м$;
- «ометаемая» площадь ВК, обозначается как $F_{\text{ВК}}$, размерность – $м^2$.

3.3. Методика определения основных энергетических и конструктивных параметров ВЭУ

При определении энергетических и конструктивных параметров ВЭУ в случае энергоснабжения изолированного потребителя типичной является ситуация, когда заранее известно количество энергетической энергии, которую необходимо поставить заказчику в течение заданного отрезка времени, например, в течение года. Согласно современным представлениям [11, С. 55] один крестьянский двор в зависимости от размеров хозяйства потребляет за год 1000...4000 кВт·ч электроэнергии. Таким образом, потребность в электроэнергии может количественно выражаться в тысячах, десятках или даже в сотнях тысяч киловатт-часов в год. Такое количество электроэнергии способна дать одна (или несколько) ВЭУ малой или средней мощности. Например, ВЭУ мощностью 50 кВт (или 10 таких установок мощностью 5 кВт) при типичном для этого класса агрегатов коэффициенте использования установленной мощности 0,2–0,3 за год в состоянии произвести электрическую энергию в количестве около 80...130 тыс. кВт·ч, что вполне достаточно для обеспечения энергией небольшого поселка.

Тем самым возникает задача определения энергетических и конструктивных параметров ВЭУ с соответствующим технико-экономическим обоснованием принимаемых решений, когда годовая потребность в электроэнергии известна. Следовательно, в качестве исходной информации служат сведения о необходимом для поставки потребителю количестве электрической энергии за определенный период времени $E_c^{ВЭУ}$, (например, за год). Такой расчет не сложно выполнить на основании данных приложения 2, где приводятся сведения о потреблении энергии различными бытовыми приборами. Кроме этого, считается известной расчетная скорость ветра V_{cp} , которая для конкретной местности может быть установлена на основании данных многолетних метеорологических наблюдений [7, 14]. Этой информации достаточно, чтобы определить установленную мощность ВЭУ, диаметр ВК и высоту башни ВА и другие параметры ВЭУ. Далее выполняется оценка эффективности инвестиций в создание комбинированной ветроэлектрической системы ВЭУ (+ ДЭС). Затем в соответствии с приложением 3 остается подобрать

наиболее близкую по своим параметрам ВЭУ отечественно (или зарубежного) производства. Все необходимое для выполнения расчетов сведения содержатся в бланке исходных данных, который включен в состав учебного пособия (приложение 7).

Основные энергетические и конструктивные параметры ВЭУ рассчитываются в такой последовательности:

3.3.1. Определяется общая потребность в электроэнергии E_C^{Π} за год для всех потребителей населенного пункта

$$E_C^{\Pi} = M_{\Pi} n_{\Pi}. \quad (3.2)$$

3.3.2. Определяется количество электроэнергии ($N_C^{\text{ВЭУ}}$), которое должно поступить от ВЭУ за время t

$$E_C^{\text{ВЭУ}} = \frac{E_C^{\text{ВЭУ}} \tau}{365}. \quad (3.3)$$

3.3.3. Определяется средняя развиваемая мощность ($N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$), то есть средняя развиваемая мощность на валу ВК ветроагрегата (ВА)

$$N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}} = \frac{E_C^{\text{ВЭУ}}}{24\tau\eta_{\Gamma}\eta_p}. \quad (3.4)$$

3.3.4. Определяется требуемая мощность воздушного потока (N_0)

$$N_0 = \frac{N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}}{C_p}. \quad (3.5)$$

3.3.5. Определяется радиус (R) и диаметр (D) ветроколеса (ВК)

$$R = \sqrt{\frac{N_0}{1,17\pi V_{\text{CP}}^3}}, \quad (3.6)$$

где N_0 – записывается с учетом того, что $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ кг м}^2/\text{с}^3$.

После вычисления радиуса находим диаметр ВК: $D = 2R$.

3.3.6. Определяется «ометаемая» площадь ($F_{\text{ВК}}$) ВК

$$F_{\text{ВК}} = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (3.7)$$

3.3.7. Определяется удельная мощность (n_0), которую «снимает» ВК с 1 м^2 «ометаемой площади»

$$n_0 = \frac{N_0}{F_{\text{ВК}}} \quad (3.8)$$

3.3.8. Определяется высота (H) башни ВЭУ

$$H = (1,3 \dots 1,7) D \quad (3.9)$$

3.3.9. Определяется удельная выработка электроэнергии ВЭУ на 1 м^2 «ометаемой» площади (e_c) за время τ

$$e_c = \frac{E_c^{\text{ВЭУ}}}{F_{\text{ВК}}}. \quad (3.10)$$

3.3.10. Определяется установленная мощность ВЭУ ($N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}$) при заданной расчетной скорости ветра (V_p)

$$N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \rho C_p \eta_{\Gamma} \eta_p F_{\text{ВК}} V_p^3 10^{-3}. \quad (3.11)$$

3.3.11. Определяется коэффициент использования установленной мощности ($K_{\text{КИС}}^{\text{ВЭУ}}$)

$$K_{\text{ИС}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}}{N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}}. \quad (3.12)$$

3.3.12. Определяется объем предотвращенной эмиссии углекислого газа ($V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}}$) при условии, что выработка 1 кВт·ч электрической энергии на органическом топливе сопровождается выбросом 0,5 кг CO_2

$$V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}} = 0,5 E_c^{\text{ВЭУ}}. \quad (3.13)$$

3.3.13. Выполняется перерасчет электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ в тепловую ($Q^{\text{ВЭУ}}$) с учетом того, что 1 кВт·ч = 860 ккал

$$Q_{\text{ск}} = E_c^{\text{ВЭУ}} \times 860. \quad (3.14)$$

3.3.14. Определяется годовая экономия условного топлива ($B^{\text{ВЭУ}}$) в случае, если ВЭУ замещает энергоустановка (традиционная), работающая на углеводном топливе

$$B^{\text{ВЭУ}} = \frac{Q^{\text{ВЭУ}}}{Q_p^n \eta_{\text{ТЭС}}}, \quad (3.15)$$

где Q_p^n – низшая рабочая теплота сгорания топлива, $Q_p^n = 7000$ ккал/кг у.т.; $\eta_{\text{ТЭС}}$ – КПД энергоустановки, работающей на углеводном топливе.

3.3.15. Определяется общее ($t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}}$) и фактическое ($t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}}$) количество часов работы замещающей ВЭУ установки (ДЭС)

$$t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}} = 365 - \tau; \quad (3.16)$$

$$t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} = t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}} k_{\text{ИС}}^{\text{ДЭС}}. \quad (3.17)$$

3.3.16. Определяется общее количество электроэнергии ($\Delta E_{\text{С}}^{\text{ДЭС}}$), которое должна выработать ДЭС

$$\Delta E_{\text{С}}^{\text{ДЭС}} = E_{\text{С}}^{\text{П}} - E_{\text{С}}^{\text{ВЭУ}} \quad (3.18)$$

3.3.17. Определяется требуемая мощность ДЭС ($N_{\text{ТР}}^{\text{ДЭС}}$) (с учетом зарядки аккумулятора на время техобслуживания)

$$N_{\text{ТР}}^{\text{ДЭС}} = \frac{\Delta E_{\text{С}}^{\text{ДЭС}}}{t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} \eta_{\text{АК}}}. \quad (3.19)$$

В соответствии с приложением 6 принимается ближайшее большее значение установленной мощности ДЭС.

В заключение дается сводка результатов:

1. Потребность в электроэнергии: $E_{\text{П}}^{\text{С}}$, кВт·ч в год;
2. Электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ: $E_{\text{С}}^{\text{ВЭУ}}$, кВт·ч в год;
3. Электроэнергия, вырабатываемая замещающей энергоустановкой (ДЭС): $\Delta E_{\text{С}}^{\text{ДЭС}}$, кВт·ч в год;
4. Средняя развиваемая мощность ВЭУ: $N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}$, кВт;
5. Установленная мощность ВЭУ: $N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}$, кВт;
6. Коэффициент использования установленной мощности: $k_{\text{ИС}}^{\text{ВЭУ}}$, доли ед.;
7. Площадь, «метаемая» ВК: $F_{\text{ВК}}$, м²;
8. Диаметр ВК: D , м;
9. Удельная мощность ветрового потока: n_0 , Вт/м²;
10. Удельная выработка электроэнергии на 1 м² «ометаемой» площади: $e_{\text{С}}$, кВт·ч/м²;
11. Высота башни ВЭУ: H , м;
12. Годовая экономия условного топлива: $V^{\text{ВЭУ}}$, т у.т.;
13. Предотвращенная эмиссия углекислого газа: $V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}}$, т;
14. Общее и фактическое время работы замещающей ВЭУ установки (ДЭС): $(t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}}) (t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}})$, час.
15. Установленная мощность ДЭС: $N_{\text{УСТ}}^{\text{ДЭС}}$.

4. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В УСТРОЙСТВА ВЭУ

Экономическая оценка эффективности устройства ВЭУ для энергоснабжения изолированного потребителя выполняется в соответствии с [12, 13]. Используется статистический метод оценки эффективности инвестиций.

Конечная цель экономической оценки – обоснованный выбор наиболее эффективной с точки зрения технико-экономических пользователей энергетической установки. Именно для этого выполняется расчет ряда количественных показателей, характеризующих в данном случае эффективность устройства комбинированной ветроэнергетической системы в составе ВЭУ и дизель-генераторной установки для целей бесперебойного обеспечения электрической энергией изолированного потребителя.

В качестве альтернативной установки помимо комбинации ВЭУ (+ДЭС), принимается традиционная электроустановка, работающая на углеводородном топливе (например, паротурбинная ТЭС), установленная мощность и годовая выработка электрической энергии, которой полностью идентична ВЭУ (+ДЭС). Делается это для сопоставимости экономических показателей и обеспечения объективной оценки преимуществ или недостатков применения того или иного источника энергии.

При статическом методе оценки эффективности инвестиций главными экономическими показателями являются расчетный срок окупаемости капитальных вложений в устройство конкретной энергетической установки ($T_{ок}^{ВЭУ}$) и нормативный срок окупаемости ин-

вестиций ($T_{\text{ок}}^{\text{ВЭУ}}$), причем первый не должен превышать нормативное значение. Нормативный срок окупаемости инвестиций ($T_{\text{ок}}^{\text{Пр}}$) связан с так называемым нормативным коэффициентом эффективности капитальных вложений n они обратно пропорциональны друг другу: $T_{\text{ок}}^{\text{Пр}} = 1/n$, для энергетики в соответствии со сложившейся традицией принимается $n = 0,12$.

Срок окупаемости капитальных вложений вычисляется как отношение общих капитальных вложений в энергоустановку к расчетному годовому экономическому эффекту ее работы.

В рассматриваемом случае общие капитальные вложения ($\sum K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}$) (складываются из двух составляющих: капитальных вложений в устройство ВЭУ ($K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}$) и затрат на приобретение ДЭС ($K_{\text{п}}^{\text{ДЭС}}$), то есть

$$\sum K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} = K_{\text{п}}^{\text{ДЭС}} + K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}. \quad (4.1)$$

Капитальные вложения в устройство ВЭУ вычисляются как произведение удельных капитальных вложений в 1 кВт установленной мощности ВЭУ $K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}$ и собственно установленной мощности ВЭУ ($N_{\text{уст}}^{\text{ВЭУ}}$) значение которой находится расчетным путем согласно разделу 3 учебного пособия.

Суммарный годовой экономический эффект ($\mathcal{E}_{\text{ф}}^{\text{СУМ}}$) представляет собой разницу между доходами и издержками. В качестве доходов рассматривается прибыль от поступления платежей за поставленную потребителю электроэнергию ($E_{\text{с}}^{\text{П}}$) согласно принятым тарифам ($k_{\text{с}}^{\text{ВЭУ}}$). Эксплуатационные издержки, связанные с работой ВЭУ ($I_{\text{эк}}^{\text{ВЭУ}}$), находятся с учетом заданной нормы издержек эксплуатации, которая согласно рекомендациям Минтопэнерго РФ составляет $\lambda = 0,05$ [6, С. 113–117].

Для вычисления издержек используется формула

$$I_{\text{эк}}^{\text{ВЭУ}} = \lambda K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} \quad (4.2)$$

Затем определяются общие эксплуатационные издержки в случае, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой

$$I_{\text{ЭК}} = I_{\text{ЭК}}^{\text{ВЭУ}} + I_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭУ}}, \quad (4.3)$$

где $I_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭУ}}$ – эксплуатационные издержки за время фактической работы ДЭС; находятся согласно рекомендациям приложения 6.

Далее определяется суммарный годовой экономический эффект ($\mathcal{E}_{\text{Ф}}^{\text{СУМ}}$) с учетом работы ВЭУ и ДЭС (доход минус издержки)

$$I_{\text{ЭК}} = E_{\text{с}}^{\text{П}} \times k_{\text{с}}^{\text{ВЭУ}} - \sum I_{\text{ЭК}}. \quad (4.4)$$

Для дизель-генераторной установки в соответствии с приложением 6 принимаются и вычисляются следующие техникоэкономические показатели:

- капитальные вложения в приобретение ДЭС, ($K_{\text{П}}^{\text{ДЭС}}$)
- стоимость капитального ремонта, ($C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}}$)
- стоимость техобслуживания, ($C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}}$)
- стоимость топлива, ($C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}}$)
- общие эксплуатационные издержки для ДЭС

$$I_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭС}} = C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}}. \quad (4.5)$$

В заключении находится искомый показатель – срок окупаемости общих капитальных вложений ($T_{\text{ОК}}^{\text{П}}$) в случае, если ВЭУ дополняется ДЭС

$$T_{\text{ОК}}^{\text{П}} = \frac{K_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}}{\mathcal{E}_{\text{Ф}}^{\text{СУМ}}}. \quad (4.6)$$

Полученное значение сравнивается с нормативным сроком окупаемости капитальных вложений

$$T_{\text{ОК}}^{\text{ПР}} = \frac{1}{n} = \frac{1}{0,12} = 8,3 \text{ лет} \quad (4.7)$$

здесь $n = 0,12$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (как уже отмечалось, в энергетике $n = 0,12$), n – величина обратная нормативному сроку окупаемости капитальных вложений ($T_{\text{ОК}}^{\text{ПР}}$).

Если $T_{\text{OK}}^{\text{П}}$ не превышает нормативный срок ($T_{\text{OK}}^{\text{ПР}}$), то рассматриваемый вариант признается экономически целесообразным с точки зрения его реализации. В противном случае требуется принятие принципиально новых технических решений.

4.1. Основные технико-экономические показатели эффективности устройства комбинированной ВЭУ

Основными технико-экономические показатели являются:

- срок окупаемости капитальных вложений в устройство комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ (+ДЭС), обозначается через $T_{\text{OK}}^{\text{П}}$, размерность – лет;
- срок окупаемости капитальных вложений в устройство традиционной установки, обозначается через $T_{\text{OK}}^{\text{ТЭС}}$, размерность – лет;
- экономическая эффективность устройства комбинированной ВЭУ, оценивается в денежном выражении, обозначается через $\mathcal{E}_{\text{Ф}}^{\text{СУМ}}$, размерность – руб.;
- удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭУ, обозначаются через $k_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – руб./кВт;
- удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности традиционной установки, обозначаются через $k_{\text{П}}^{\text{ТЭС}}$, размерность – руб./кВт;
- нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений, обозначается через n , размерность – доли. ед.;
- капитальные вложения в устройство ВЭУ, обозначаются через $K_{\text{н}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – руб.;
- капитальные вложения в устройство ДЭС, обозначаются через $K_{\text{н}}^{\text{ТЭС}}$, размерность – руб.;
- общие капитальные вложения в устройство комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), обозначаются через $\sum K_{\text{н}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – руб.;
- эксплуатационные издержки при работе ВЭУ, обозначаются через $I_{\text{ЭК}}^{\text{ВЭУ}}$, размерность – руб./год;
- общие эксплуатационные издержки при работе комбиниро-

ванной ветроэлектрической установки (ВЭУ+ДЭС), обозначаются через $\sum I_{ЭК}$, размерность – руб./год;

- суммарный годовой экономический эффект при совместной работе комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), обозначаются через $\mathcal{E}_ф^{СУМ}$, размерность – руб.;

- удельная экономия затрат на топливе при устройстве ВЭУ вместо энергоустановки, работающей на традиционном топливе(например, паротурбинная ТЭС), обозначается через ΔC_T , размерность – руб./кВт·ч;

- тариф на электроэнергию, поставляемую потребителю от комбинированной электроустановки ВЭУ(+ДЭС), обозначается через $k_C^{ВЭУ}$, размерность – руб./кВт·ч;

- тариф на электроэнергию, поставляемую потребителю от традиционной установки, обозначается через $k_C^{ТЭС}$, размерность – руб./кВт·ч.

4.2. Методика определения технико-экономических показателей эффективности устройства комбинированной ВЭУ

Для оценки экономической эффективности устройства ВЭУ должен быть известен главный искомый энергетический показатель – установленная мощность ветроэлектрической установки следует отметить, что стоимость установленной мощности обычно включается стоимость производства соответствующего оборудования, расходы на его транспортировку на место установки и стоимость строительства (монтажа) [6, С. 111]. Кроме этого, считаются известными размер удельных капитальных вложений в 1 кВт установленной мощности для ВЭУ так же, как и для традиционной энергоустановки, работающей на углеводородном топливе (например, ТЭС). Также считается, известной стоимость единицы условного топлива руб./т у. т. с учетом мировых цен на нефть. Все перечисленные параметры содержатся в бланке исходных данных, который включен в состав методического пособия и служит основой для выполнения соответствующих расчетов (приложение 7). Кроме этого предполагается, что в соответствии с приложением 6 определены технико-

экономические показатели ДЭС.

Оценка эффективности инвестиций в энергообеспечение изолированного потребителя выполняется для двух вариантов:

1 вариант – ВЭУ+ дизель-генераторная установка (ДЭС);

2 вариант – вместо ВЭУ(+ДЭС) электроэнергия поступает от традиционной установки с такими же энергетическими показателями.

Расчет основных технико-экономических показателей для каждого варианта рекомендуется приводить в последовательности, представленной ниже.

Вариант 1. Устройство ВЭУ(+ДЭС).

4.2.1. *Определение технико-экономических показателей ДЭС, если известны общее и фактическое время работы ДЭС ($t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}}$) сут., ($t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}}$), ч. (см. приложение 6 методического пособия):*

Капитальные вложения в приобретение ДЭС – ($K_{\text{п}}^{\text{ДЭС}}$)

Стоимость капитального ремонта – ($C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}}$)

Стоимость техобслуживания – ($C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}}$)

Стоимость топлива ($C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}}$) при цене за 1 кг $\Pi_{\text{ТОП}}$ если q – удельный расход топлива (кг/ч)

$$C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}} = q_{\text{ТОП}} t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} \Pi_{\text{ТОП}}. \quad (4.8)$$

Таким образом, эксплуатационные издержки для ДЭС составляют:

$$И_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭС}} = C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}}. \quad (4.9)$$

4.2.2. *Определение капитальных вложений $K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}$ в устройство ВЭУ*

$$K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} = k_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} \quad (4.10)$$

4.2.3. *Определение общих капитальных вложений, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой (ДЭС)*

$$\sum K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} = K_{\text{п}}^{\text{ДЭС}} + K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}} \quad (4.11)$$

4.2.4. *Определение удельного расхода топлива для традиционной энергетической установки*

$$e_{\text{ТЭС}} = \frac{123}{\eta_{\text{ТЭС}}} \quad (4.12)$$

где $\eta_{\text{ТЭС}}$ – КПД традиционной энергетической установки, 123 – теоретический эквивалент условного топлива, т у. т./кВт·ч

4.2.5. *Определение удельной экономии затрат на топливе при устройстве ВЭУ(+ДЭС) вместо традиционной энергетической установки*

$$\Delta C_{\text{T}} = \rho_{\text{T}} e_{\text{ТЭС}} \quad (4.13)$$

где P_{T} – стоимость единицы условного топлива; ΔC_{T} – рассматривается как нижняя граница тарифа на электроэнергию, которая в отсутствии ВЭУ(+ДЭС) была бы выработана традиционной энергоустановкой.

С учетом мировых цен на органическое топливо рекомендуется принимать $k_{\text{с}}^{\text{ВЭУ}} \geq 0,08$ долл./кВт·ч.

4.2.6. *Определение эксплуатационных издержек при работе ВЭУ (норма издержек $\lambda = 0,05$ согласно рекомендациям Минтопэнерго РФ)*

$$I_{\text{эк}}^{\text{ВЭУ}} = \lambda K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}. \quad (4.14)$$

4.2.7. *Определение общих эксплуатационных издержек в случае, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой*

$$\sum I_{\text{эк}} = I_{\text{эк}}^{\text{ВЭУ}} + I_{\text{эк}}^{\text{ДЭУ}}. \quad (4.15)$$

4.2.8. *Определение суммарного годового экономического эффекта при совместной работе ВЭУ и дизель-генераторной установки (доход минус издержки)*

$$\mathcal{E}_{\text{ф}}^{\text{СУМ}} = E_{\text{с}}^{\text{п}} k_{\text{с}}^{\text{ВЭУ}} - \sum I_{\text{эк}}. \quad (4.16)$$

4.2.9. *Определение срока окупаемости общих капитальных вложений в случае, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой*

$$T_{\text{ок}}^{\text{п}} = \frac{K_{\text{п}}^{\text{ВЭУ}}}{\mathcal{E}_{\text{ф}}^{\text{СУМ}}}. \quad (4.17)$$

Как указывается выше, $T_{\text{OK}}^{\text{П}}$ сравнивается с $T_{\text{OK}}^{\text{ПП}}$, причем

$$T_{\text{OK}}^{\text{ПП}} = \frac{1}{n} = \frac{1}{0,12} = 8,3 \text{ лет} - \text{предельно допустимый срок окупаемости}$$

капитальных вложений (инвестиций),

n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $n = 0,12$ (энергетика); n – величина обратная предельно допустимому сроку окупаемости капитальных вложений.

Если $T_{\text{OK}}^{\text{П}} < T_{\text{OK}}^{\text{ПП}}$, то устройство ВЭУ+ДЭС окупится в течение нормативного срока, если условие не выполняется, то следует сделать вывод противоположного характера.

4.2.10. Определение значений предельно допустимых удельных $\Delta k^{\text{ПП}}$ и общих $K_{\text{П}}^{\text{ПП}}$ капитальных вложений в устройство ВЭУ(+ДЭС)

$$\Delta k^{\text{ПП}} = \frac{\Delta C_{\text{T}}}{n} \quad (4.18)$$

$$K_{\text{П}}^{\text{ПП}} = \Delta k^{\text{ПП}} E_{\text{С}}^{\text{СК}}. \quad (4.19)$$

По результатам вычислений надо сделать вывод о том, сто капитальные вложения в устройство ВЭУ(+ДЭС) меньше или больше предельно допустимых значений.

Вариант 2. Вместо ВЭУ(+ДЭС) электроэнергия поступает от традиционной, энергоустановки с такими же энергетическими показателями.

Вариант 2 выполняется при условии, что $N_{\text{УСТ}}^{\text{ТЭС}} = N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}$, $E_{\text{С}}^{\text{ТЭС}} = E_{\text{С}}^{\text{П}}$, $k_{\text{С}}^{\text{ТЭС}} = k_{\text{С}}^{\text{ВЭУ}}$.

4.2.11. Определение капитальных вложений в обеспечение электроэнергией от традиционной установки

$$K_{\text{П}}^{\text{ТЭС}} = k_{\text{П}}^{\text{ТЭС}} N_{\text{УСТ}}^{\text{ТЭС}}. \quad (4.20)$$

4.2.12. Определение потребности в топливе для традиционной установки

$$B^{\text{ТЭС}} = v^{\text{ТЭС}} E_{\text{С}}^{\text{П}} \quad (4.21)$$

4.2.13. Определение эксплуатационных издержек (затрат) для традиционной энергоустановки с учетом затрат на закупку топлива

$$I_{\text{ЭК}}^{\text{ТЭС}} = k_{\text{ЭК}}^{\text{ТЭС}} B^{\text{ТЭС}} P_{\text{T}}. \quad (4.22)$$

Здесь $k_{\text{ЭК}}^{\text{ТЭС}}$ – коэффициент повышения эксплуатационных издержек с учетом доли закупки топлива в общих затратах на эксплуатацию традиционной установки.

4.2.14. Определение годового экономического эффекта в случае обеспечения электроэнергией от традиционной энергоустановки

$$\mathcal{E}_{\Phi}^{\text{ТЭС}} = E_{\text{С}}^{\text{П}} k_{\text{С}}^{\text{ТЭС}} - I_{\text{ЭК}}^{\text{ТЭС}}. \quad (4.23)$$

4.2.15. Определение срока окупаемости $T_{\text{ОК}}^{\text{ТЭС}}$ устройства традиционной энергоустановки

$$T_{\text{ОК}}^{\text{ТЭС}} = \frac{K_{\text{П}}^{\text{ТЭС}}}{\mathcal{E}_{\Phi}^{\text{ТЭС}}} \leq \text{ИЛИ} \geq (\text{лет}) T_{\text{ОК}}^{\text{ПП}} = 8,3 \text{ лет} \quad (4.24)$$

Вывод: В зависимости от полученного результата ($T_{\text{ОК}}^{\text{ТЭС}}$ больше или меньше нормативного срока окупаемости капитальных вложений $T_{\text{ОК}}^{\text{ПП}}$) делается вывод о целесообразности (или ее отсутствии) устройства традиционной энергоустановки вместо ВЭУ, дополненной ДЭС.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИВЕСТИЦИЙ В ЕЕ УСТРОЙСТВО (ПРИМЕР РАСЧЕТА)

Для бесперебойной подачи электроэнергии потребителю ветроэлектрическая установка (ВЭУ) дополняется дизель-генераторной станцией (ДЭС) на период штиля или недостаточной скорости ветра. В качестве другого возможного варианта источника энергии рассматривается использование электроэнергии, поступающей от традиционной энергоустановки, например, паротурбинной ТЭС. Исходные данные для расчета представлены в соответствующем бланке (см. приложение 7).

Исходные данные:

- 1) количество потребителей электроэнергии (крестьянских дворов) в населенном пункте: $M_{\Pi} = 18$ потребителей;
- 2) норма выработки электроэнергии в расчете на одного потребителя в год; $n_{\Pi} = 3600 \text{ кВт}\cdot\text{ч в год}$;
- 3) общее время работы ВЭУ в течение года (τ), сутки: (τ) = 320 сут в год;
- 4) средняя скорость ветра за время работы ВЭУ (τ); $V_{\text{CP}} = 4,9 \text{ м/с}$;
- 5) расчетная скорость ветра, при которой обеспечивается установленная мощность ВЭУ (V_P): $V_P = 8,0 \text{ м/с}$;
- 6) коэффициент мощности ВК, $C_P = 0,37$;
- 7) удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭУ: $k_n^{\text{ВЭУ}} = 70\,000 \text{ руб./кВт}$;

8) удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности традиционной энергоустановки: $k_n^{TЭС} = 42\,000 \text{ руб./кВт}$;

9) стоимость единицы условного топлива: $\rho_T = 14\,700 \text{ руб./т у. т.}$

5.1. Расчет энергетических и конструктивных параметров комбинированной ветроэлектрической установки (ВЭУ)

5.1.1. *Определение годовой потребности в электроэнергии для всех потребителей населенного пункта*

$$E_n^{СК} = M_{\Pi} n_{\Pi} = 18 \times 3600 = 64\,800 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}$$

5.1.2. *Определение количества электроэнергии, которое должно поступить от ВЭУ за время (τ)*

$$E_C^{ВЭУ} = \frac{E_C^{СК} \tau}{365} = \frac{64\,800 \times 320}{365} = 56\,811 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

5.1.3. *Определение требуемой средней развиваемой мощности ВЭУ*

$$N_{\Pi}^{ВЭУ} = \frac{E_C^{ВЭУ}}{24\tau\eta_{Г}\eta_{р}} = \frac{56\,811}{24 \times 320 \times 0,95 \times 0,9} = 8,65 \text{ кВт.}$$

где $\eta_{Г} = 0,95$ – КПД генератора, $\eta_{р} = 0,9$ – КПД редуктора

5.1.4. *Определение требуемой мощности воздушного потока (N_0)*

$$N_0 = \frac{N_{\Pi}^{ВЭУ}}{C_p} = \frac{8,65}{0,37} = 23,4 \text{ кВт}$$

где $C_p = 0,37$ – коэффициент мощности ВК ВЭУ.

5.1.5. *Определение радиуса (R) и диаметра (D) ВК, известна требуемая мощность воздушного потока (N_0) и средняя скорость ветра ($V_{ср}$) за время работы ВЭУ (τ)*

$$R = \sqrt{\frac{N_0}{1,17\pi V_{ср}^3}} = \sqrt{\frac{23,4 \times 10^3}{1,17 \times 3,14 \times 4,9^3}} = 7,4 \text{ кВт,}$$

где N_0 – записывается с учетом того, что $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$.

После вычисления радиуса находим диаметр ВК:
 $D = 2R = 14,8 \text{ м}$

5.1.6. Определение «ометаемой» площади ($F_{\text{БК}}$) ВК

$$F_{\text{БК}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times 14,8^2}{4} = 172 \text{ м}^2$$

5.1.7. Определение удельной мощности (n_0), которую «снимает» ВК с 1 м² «ометаемой» площади

$$n_0 = \frac{N_0}{F_{\text{БК}}} = \frac{23,4 \times 10^3}{172} = 136 \text{ Вт / м}^2$$

5.1.8. Определение высоты (H) башни ВЭУ

$$H = (1,3 \dots 1,7) D = 1,5 \times 14,8 = 22,2 \text{ м}$$

5.1.9. Определение удельной выработки электроэнергии на 1 м² «ометаемой площади» (e_c)

$$e_c = \frac{E_c^{\text{ВЭУ}}}{F_{\text{БК}}} = \frac{56\,811}{172} = 330 \text{ кВт} \cdot \text{ч / м}^2$$

5.1.10. Определение установленной мощности ВЭУ $N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}$ при заданной расчетной скорости ветра $V_P = 8 \text{ м/с}$ ($\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха)

$$N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \times \rho C_p \eta_{\Gamma} \eta_p F_{\text{БК}} V_P^3 \times 10^{-3}$$

$$N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,37 \times 0,95 \times 172 \times 8^3 \times 10^{-3} = 17,1 \text{ кВт}$$

5.1.11. определение коэффициента использования установленной мощности ($k_{\text{ИС}}^{\text{ВЭУ}}$)

$$k_{\text{ИС}}^{\text{ВЭУ}} = \frac{N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}}{N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}} = \frac{8,65}{17,1} = 0,50.$$

5.1.12. определение объема предотвращенной эмиссии углекислого газа $V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}}$, если выработка кВт·ч электрической энергии на органическом топливе сопровождается выбросом 0,5 кг CO₂

$$V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}} = 0,5 E_c^{\text{ВЭУ}} = 0,5 \times 56\,811 = 28\,400 \text{ кг} = 28,4 \text{ т.}$$

5.1.13. Пересчет электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, в тепловую энергию ($Q^{\text{ВЭУ}}$), если 1 кВт·ч = 860 ккал

$$Q^{\text{ВЭУ}} = E_c^{\text{ВЭУ}} \times 860 = 56\,811 \times 860 = 48,9 \times 10^6 \text{ ккал / год}$$

5.1.14. Определение годовой эмиссии условного топлива ($B^{BЭУ}$) в случае, если ВЭУ замещена бы традиционная энергоустановка, работающая на органическом топливе и имеющая такую же условную мощность

$$B^{BЭУ} = \frac{Q^{BЭУ}}{Q_p^n \eta_{ТЭС}} = \frac{48,9 \times 10^6}{7000 \times 0,35} = 19\,960 \text{ кг у.т.} = 20 \text{ т у.т.}$$

где Q_p^n – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива, $Q_p^n = 7000$ ккал/кг у.т.; $\eta_{ТЭС}$ – КПД традиционной энергоустановки; $\eta_{ТЭС} = 0,35$

5.1.15. Определение общего $t_{ДОП}^{ДЭС}$ и фактического $t_{ФАК}^{ДЭС}$ количества часов работы дополняющей ВЭУ установки (ДЭС)

$$t_{ДОП}^{ДЭС} = 365 - \tau = 365 - 320 = 45 \text{ сут} = 1080 \text{ ч};$$

$$t_{ФАК}^{ДЭС} = t_{ДОП}^{ДЭС} \times k_{ИС}^{ДЭС} = 1080 \times 0,8 = 864 \text{ ч},$$

где $k_{ИС}^{ДЭС} = 0,8$ – коэффициент использования установленной мощности ДЭС.

5.1.16. Определение количества электроэнергии

$$\Delta E_C^{ДЭС} = C_C^П - E_C^{BЭУ} = 64\,800 - 56\,811 = 7989 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

5.1.17. Определение требуемой мощности ДЭС $N_{ТР}^{ДЭС}$

$$N_{ТР}^{ДЭС} = \frac{\Delta E_C^{ДЭС}}{t_{ФАК}^{ДЭС} \cdot \eta_{АК}} = \frac{7989}{864 \cdot 0,9} = 10,3 \text{ кВт},$$

где $\eta_{АК} = 0,9$ – КПД аккумуляторной батареи, от которой электроэнергию получает потребитель во время остановки ДЭС на техобслуживание.

В соответствии с приложением 6 методического принимаем ближайшее большее значение установленной мощности ДЭС, в данном случае ДЭС марки АД-16С-Т400-1В установленной мощностью $N_{УСТ}^{ДЭС} = 16$ кВт.

5.1.18. Уточнение фактического времени работы ДЭС ($N_{УСТ}^{ДЭС} = 16$ кВт) с учетом остановки на техобслуживание ($t_{ФАК}^{ДЭС}$)

$$t_{ФАК}^{ДЭС} = \frac{\Delta E_C^{ДЭС}}{N_{УСТ}^{ДЭС} \eta_{АК}} = \frac{7989}{16 \times 0,9} = 555 \text{ ч}.$$

Результаты расчетов:

1. Потребность в электроэнергии $E_C^П = 64\,800$ кВт·ч в год;
2. Электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ: $E_C^{BЭУ} = 56\,811$ кВт·ч в год;

1. Электроэнергия, вырабатываемая замещающей энергоустановкой (ДЭС):

$$\Delta E_C^{\text{ДЭС}} = 7989 \text{ кВт}\cdot\text{ч в год};$$

2. Средняя развиваемая мощность ВЭУ: $N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}} = 8,65 \text{ кВт};$

3. Установленная мощность ВЭУ: $N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} = 17,1 \text{ кВт};$

4. Коэффициент использования установленной мощности: $(k_{\text{ИС}}^{\text{ВЭУ}}) = 0,50.$

5. Площадь, «ометаемая» ВК: $F_{\text{ВК}} = 172 \text{ м}^2;$

6. Диаметр ВК: $D = 14,8 \text{ м}^2;$

7. Удельная мощность ветрового потока: $n_0 = 136 \text{ Вт/м}^2;$

8. Удельная выработка электроэнергии на 1 м² «ометаемой» площади: $e_C = 330 \text{ кВт/м}^2;$

9. Высота башни ВЭУ: $H = 22,2 \text{ м};$

10. Годовая эмиссия условного топлива: $V^{\text{ВЭУ}} = 20,0 \text{ т у.т.};$

11. Предотвращенная эмиссия углекислого газа: $V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}} = 32 \text{ т};$

12. Общее и фактическое время работы замещающей ВЭУ установки (ДЭС):

$$t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}} = 45 \text{ сут.}; t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} = 555 \text{ ч};$$

13. Установленная мощность ДЭС: $N_{\text{УСТ}}^{\text{ДЭС}} = 16 \text{ кВт},$ марка ДЭС АД-С-400-1В.

5.2. Оценка экономической эффективности инвестиций в устройство комбинированной ветроэлектрической установки (ВЭУ)

Вариант 1. Устройство ВЭУ(+ДЭС)

5.2.1. *Определение технико-экономических показателей ДЭС, если известны общее и фактическое время работы ДЭС ($t_{\text{ДОП}}^{\text{ДЭС}} = 45$ сут; $t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} = 555$ ч;), см. приложение 6 учебного пособия:*

- капитальные вложения в приобретение ДЭС: $K_{\text{н}}^{\text{ДЭС}} = 441\,000$ руб.;

- стоимость капитального ремонта:

$$C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}} = 50\,400 \times \frac{45}{365} = 6214 \text{ руб.};$$

- стоимость техобслуживания:

$$C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}} = 84\,000 \times \frac{45}{365} = 10\,356 \text{ руб.};$$

- стоимость топлива при цене за 1 кг $C_{\text{ТОП}} = 10 \text{ руб.}$

$$C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}} = q_{\text{ТОП}} \times t_{\text{ФАК}}^{\text{ДЭС}} C_{\text{ТОП}} = 5 \times 555 \times 10 = 27\,750 \text{ руб.}$$

где $q = 5 \text{ кг/ч}$ – удельный расход топлива.

Таким образом, эксплуатационные издержки для ДЭС составляют

$$И_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭС}} = C_{\text{РЕМ}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТО}}^{\text{ДЭС}} + C_{\text{ТОП}}^{\text{ДЭС}} = 6214 + 10356 + 27750 = 44\,320 \text{ руб.}$$

5.2.2. Определение капитальных вложений

$$K_n^{\text{ВЭУ}} = k_n^{\text{ВЭУ}} \times N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}} = 70\,000 \times 17,1 = 1\,197\,000 \text{ руб.}$$

5.2.3. Определение общих капитальных вложений ($\sum K_n^{\text{ВЭУ}}$), если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой (ДЭС)

$$\sum K_n^{\text{ВЭУ}} = K_n^{\text{ВЭУ}} + K_n^{\text{ДЭС}} = 1\,197\,000 + 441\,000 = 1\,638\,000 \text{ руб.}$$

5.2.4. Определение удельного расхода топлива ($b^{\text{ТЭС}}$) для традиционной энергетической установки

$$b^{\text{ТЭС}} = \frac{123}{\eta_{\text{ТЭС}}} = \frac{123}{0,35} = 351 \text{ кг у.т. / кВт} \cdot \text{ч} = 3,51 \times 10^{-4} \text{ т у.т. / кВт} \cdot \text{ч}$$

где $\eta_{\text{ТЭС}}$ – КПД традиционной энергетической установки, $\eta_{\text{ТЭС}} = 0,35$; 123 – теоритический эквивалент условного топлива, т у.т./кВт·ч.

5.2.5. Определение удельной экономии затрат на топливе (ΔC_T) при устройстве ВЭУ(+ДЭС) вместо традиционной энергетической установки

$$\Delta C_T = \rho_T b^{\text{ТЭС}} = 14\,700 \times 3,51 \times 10^{-4} = 5,16 \text{ руб. / кВт} \cdot \text{ч}$$

где $\rho_T = 14\,700 \text{ руб./т у.т.}$ – стоимость единицы условного топлива; ΔC_T – рассматривается как нижняя граница тарифа на электроэнергию, которая в отсутствии ВЭУ(+ДЭС) была бы выработана традиционной энергоустановкой.

С учетом мировых цен на органическое топливо принимаем $k_C^{BЭУ} \geq 5,6$ руб./кВт·ч для электроэнергии, поступающей от комбинированной ВЭУ.

5.2.6. *Определение эксплуатационных издержек $I_{ЭК}^{СК}$ при работе ВЭУ (норма издержек эксплуатации $\lambda = 0,05$)*

$$I_{ЭК}^{СК} = \lambda \times K_n^{BЭУ} = 0,05 \times 1\,197\,000 = 59\,850 \text{ руб./год}$$

5.2.7. *Определение общих эксплуатационных издержек $\sum I_{ЭК}$ в случае, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой*

$$\sum I_{ЭК} = I_{ЭК}^{СК} + I_{ЭК}^{ДЭС} = 59\,850 + 44\,320 = 104\,170 \text{ руб.}$$

5.2.8. *Определение суммарного годового экономического эффекта ($\mathcal{E}_\Phi^{СУМ}$) при совместной работе ВЭУ и дизель-генераторной установки (доход минус издержки)*

$$\mathcal{E}_\Phi^{СУМ} = E_C^\Pi \times k_C^\Pi - I_{ЭК} = 64\,800 \times 5,6 - 104\,170 = 258\,180 \text{ руб.}$$

5.2.9. *Определение срока окупаемости общих капитальных вложений ($T_{ОК}^\Pi$) в случае, если ВЭУ дополняется дизель-генераторной установкой*

$$T_{ОК}^\Pi = \frac{\sum K_n^{BЭУ}}{\mathcal{E}_\Phi^{СУМ}} = \frac{1\,197\,000}{258\,180} = 4,6 \text{ лет} < T_{ОК}^{\Pi\Pi} = 8,3 \text{ лет,}$$

где $T_{ОК}^{\Pi\Pi} = \frac{1}{n} = \frac{1}{0,12} = 8,3$ лет – предельно допустимый срок окупаемости капитальных вложений (инвестиций); n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $n = 0,12$ (энергетика); n – величина обратная предельно допустимому сроку окупаемости капитальных вложений.

Вывод. Устройство ВЭУ, дополненной дизель-генераторной установкой, окупится в течение допустимого срока.

5.2.10. *Определение значений предельно допустимых удельных ($\Delta k^{\Pi\Pi}$) и общих ($K_n^{\Pi\Pi}$) капитальных вложений в устройство ВЭУ(+ДЭС)*

$$\Delta k^{\Pi\Pi} = \frac{\Delta C_T}{n} = \frac{5,16}{0,12} = 43 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}$$

$$K_n^{np} = \Delta k^{np} E_C^{\Pi} = 43 \times 64\,800 = 2\,786\,400 \text{ руб.}$$

$$> \sum K_n^{BЭУ} = 1\,197\,000 \text{ руб.}$$

Вывод

Капитальные вложения в устройство ВЭУ (+ДЭС) меньше предельно допустимых значений.

Вариант 2. Вместо ВЭУ (+ДЭС) электроэнергия поступает от традиционной энергоустановки с такими же энергетическими показателями ($N_{уст}^{ТЭС} = N_{уст}^{BЭУ}$; $E_C^{ТЭС} = E_C^{\Pi}$; $k_C^{ТЭС} = k_C^{BЭУ}$).

5.2.11. Определение общих капитальных вложений ($K_n^{ТЭС}$) в обеспечение электроэнергией от традиционной энергетической установки

$$K_n^{ТЭС} = k_n^{ТЭС} N_{уст}^{BЭУ} = 42\,000 \times 17,1 = 718\,200 \text{ руб.}$$

5.2.12. Определение потребности в топливе для традиционной энергетической установки

$$B^{ТЭС} = b^{ТЭС} E_C^{\Pi} = 3,51 \times 10^{-3} \times 64\,800 = 22,8 \text{ т у.т}$$

5.2.13. Определение эксплуатационных издержек (затрат) для традиционной энергетической установки ($I_{ЭК}^{ТЭС}$) с учетом доставки топлива

$$I_{ЭК}^{ТЭС} = k_{ЭК}^{ТЭС} \times B^{ТЭС} \times \rho_T = 1 \times 22,8 \times 14\,700 = 335\,160 \text{ руб./год,}$$

где $k_{ЭК}^{ТЭС}$ – коэффициент повышения эксплуатационных издержек с учетом доли доставки топлива в общих затратах на эксплуатацию традиционной установки. $k_{ЭК}^{ТЭС} = 1$. (условно занижен, хотя в реальных условиях может принимать значения $k_{ЭК}^{ТЭС} \leq 3$).

5.2.14. Определение годового экономического эффекта в случае устройства традиционной энергетической установки

$$\mathcal{E}_{\Phi}^{ТЭС} = E_C^{\Pi} \times k_C^{ТЭС} - I_{ЭК}^{ТЭС} = 64\,800 \times 5,6 - 335\,160 = 27\,720 \text{ руб.}$$

5.2.15. Определение срока окупаемости ($T_{ок}^{ТЭС}$) капитальных вложений в устройство традиционной установки

$$T_{\text{OK}}^{\text{ТЭС}} = \frac{K_n^{\text{ТЭС}}}{\Xi_{\Phi}^{\text{ТЭС}}} = \frac{718\,200}{27\,720} = 26 > T_{\text{OK}}^{\text{ПП}} = 8,3 \text{ лет.}$$

Вывод

Устройство традиционной установки вместо ВЭУ(+ДЭС) не окупится в течение нормативного срока.

Заключение

Результаты выполненного технико-экономического расчета подтверждают целесообразность устройства комбинированной энергетической установки (ВЭУ+ дизель-генератор). Согласно приложению 3 учебного пособия в качестве ветроэлектрических установок принимаются две ВЭУ марки «Радуга-008» и ДЭС марки АД-16С-Т400-1В (приложение 6).

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ

Ветроэнергетика – наиболее динамично развивающаяся отрасль альтернативной (нетрадиционной) энергетики. Бурный темп роста использования энергии ветра обусловлен очевидными причинами:

- Положительное влияние на общий экологический фон на Земле;
- Сокращение потребности в органических видах топлива;
- Увеличение надежности энергоснабжения;
- Обеспечение рабочих мест для населения;
- Неисчерпаемость источника энергии – ветра.

Наибольшее развитие ветроэнергетика получила в Северной Америке и в Европе, в частности, в США, Дании, Германии и Испании. На долю этих государств приходилось более трех четвертей всего мирового парка ВЭУ (конец XX века). Уделяется серьезное внимание ветроэнергетике и в развивающихся странах – Индии, Китае, включая Южную Америку.

К 1997 году общая установленная мощность ВЭУ в мире достигла 5250 МВт, из них на долю европейских стран приходится 2500 МВт.

В 1998 году установленная мощность всех эксплуатируемых ветроэлектрических установок составила порядка 1000 МВт. В течение 1999 года были введены в строй ВЭУ общей мощностью около 4000 МВт стоимостью порядка 280 млрд руб.

По обобщенным данным Европейской и Американской Ассоциации Ветроэнергетики на конец 1999 года установленная мощность всех эксплуатируемых ВЭУ в мире достигла 14 000 МВт, из которых более 9000 МВт приходится на Европу.

За период с 1995 по 1999 годы средний ежегодный рост продаж ВЭУ составил 40 %.

В течение 1999 года в европейских странах были установлены ВЭУ общей мощностью более 3000 МВт, причем в Германии – 1600 МВт, в Испании – 900 МВт.

Германия с 1998 года возглавляет список стран, лидирующих в развитии ветроэнергетики.

**Таблица П1-1 – Установленная мощность ВЭУ в мире.
Топ – 10 стран по суммарной мощности ВЭС (на 01.01.2017 г.)**

Страна	Установленная мощность, ГВт
Китай	188,6
США	89
Германия	56,1
Индия	32,8
Испания	23,2
Великобритания	18,9
Франция	13,8
Бразилия	12,8
Канада	12,2
Италия	9,5

**Таблица П1-2 – Установленная мощность – нетто ВИЭ (без ГЭС),
установленных в Европе, на 2017 год**

(источник: <https://www.sites.google.com/a/eeseaec.org/eeseaec/contact-us/obsie-obemnye-tehniko-ekonomiceskie-pokazateli/rr---3-1/ustanovlennaa-mosnost-vie> – дата обращения 27.12.2019 г.)

Страна и группа стран	Мощность ВЭУ, МВт					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Германия	65 068	70 212	76 538	83 851	90 337	98 089
Дания	4564	5390	5494	5859	6097	6428
Нидерланды	2802	3459	3913	4906	6306	7106
Италия	25 615	27 456	28 045	28 806	29 434	30 186
Великобритания	10 792	14 227	18 611	23 916	28 099	32 629
Швеция	3630	4237	5148	5923	6588	6855
Греция	3289	4388	4574	4695	4974	5230
Ирландия	1705	2009	2285	2453	2792	3334
Португалия	4675	4931	5296	5408	5663	5733
Австрия	1675	2302	2896	3427	3827	4157
Франция	12 153	13 763	15 382	17 630	19 449	22 258
Бельгия	4017	4682	4958	5307	5695	6415
Финляндия	265	456	638	1019	1598	2115
Люксембург	133	153	168	180	242	248
<i>ЕЭС в целом</i>	<i>140 383</i>	<i>157 665</i>	<i>173 946</i>	<i>193 380</i>	<i>211 101</i>	<i>230 783</i>
Турция	176	207	248	265	277	289
Норвегия	705	818	859	867	883	1207
Чехия	2280	2326	2346	2356	2350	2378
Польша	1882	1902	2224	2509	3108	3228
Швейцария	486	816	1121	1454	1739	1981
Румыния	1863	3534	4537	4456	4397	4403
<i>Всего</i>	<i>147 775</i>	<i>167 268</i>	<i>185 281</i>	<i>205 287</i>	<i>223 855</i>	<i>244 269</i>

Дальнейший рост ветроэнергетики наблюдался и в последующие годы.

**Таблица П1-3- Структура установленной мощности электростанций
объединенных энергосистем и ЕЭС России на январь 2020 года**

Энергообъединение	Всего, МВт	ТЭС		ГЭС		АЭС		ВЭС		СЭС	
		МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%
ЕЭС РОССИИ	246 342,45	164 612,14	66,82	49 870,29	20,24	30 313,18	12,31	184,12	0,07	1362,72	0,55
ОЭС Центра	52 648,58	36 070,23	68,51	1800,07	3,42	14 778,28	28,07	–	–	–	–
ОЭС Средней Волги	27 493,88	16 203,48	58,93	7013,00	25,51	4072,00	14,81	85,4	0,31	120	0,44
ОЭС Урала	53 696,44	49 979,59	93,08	1901,19	3,54	1485,00	2,77	1,66	0,00	329	0,61
ОЭС Северо-Запада	24 472,11	15 572,14	63,63	2947,24	12,04	5947,63	24,30	5,1	0,02	–	–
ОЭС Юга	24 857,73	13 757,29	55,34	6289,69	25,30	4030,27	16,21	91,96	0,37	688,52	2,77
ОЭС Сибири	52 104,76	26 577,96	51,01	25 301,60	48,56	–	–	–	–	225,2	0,43
ОЭС Востока	11 068,95	6451,45	58,28	4617,50	41,72	–	–	–	–	–	–

*по данным Министерства энергетики на 01.01.2020 г. <https://minenergo.gov.ru/node/532>

49

Таблица П1-4 - Ресурсы (потенциалы) ветровой энергии России. Сводные данные по федеральным округам (2007 год)

Федеральный округ	Валовый ресурс			Технический ресурс			Экономические ресурсы		
	млрд кВт·ч	млн т у.т.*	млн т у.т.**	млрд кВт·ч	млн т у.т.*	млн т у.т.**	млрд кВт·ч	млн т у.т.*	млн т у.т.**
Всего в том числе	2 606 635,00	886 256	320 199	6516,6	2215,6	800,5	32,6	11,08	4
Центральный ФО	28 717,00	9764	3528	71,79	24,41	8,82	0,36	0,12	0,04
Северо-Западный ФО	173 034,00	58 831	21 255	432,58	147,08	53,14	2,16	0,74	0,27
Южный ФО	70 633,00	24 015	8677	176,58	60,04	21,69	0,88	0,3	0,11
Приволжский ФО	94 502,00	32 131	11 609	236,26	80,33	29,02	1,18	0,4	0,15
Уральский ФО	646 795,00	219 910	79 452	1617	549,78	198,63	8,08	2,75	0,99
Сибирский ФО	605 192,00	205 765	74 342	1513	514,41	185,85	7,56	2,57	0,93
Дальневосточный ФО	987 762,00	335 839	121 337	2469,4	839,6	303,34	12,35	4,2	1,52

* Расчет ресурсов по замещению органического топлива

** Расчет ресурсов по отношению физических величин

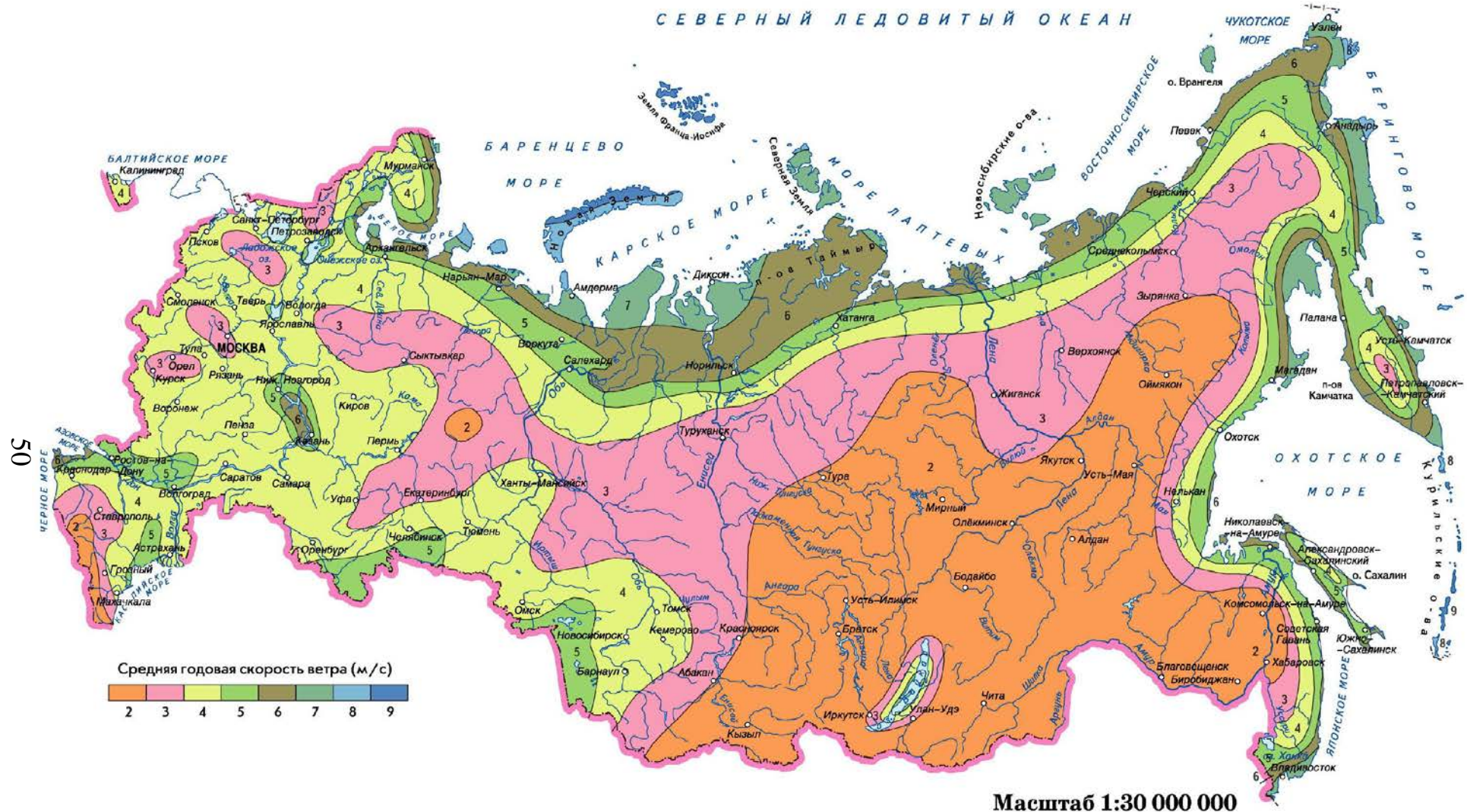


Рисунок П1.1 – Карта среднегодовой скорости ветра в Российской Федерации

Таблица П1-5 – Сила ветра по шкале Бофорта и ее влияние на ВЭУ

Баллы Бофорта	Скорость ветра, м/с	Характеристики ветра	Наблюдаемые эффекты действия	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия работы ВЭУ при средней скорости ветра
0	0,0...0,4	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально	нет	Отсутствуют
1	0,4...1,8	Тихий	Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры неподвижен. На воде появляется рябь		
2	1,8...3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливые волнения		
3	3,6...5,8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, на отдельных волнах появляются барашки (гребни)	Вращаются тихоходные ветроколеса	Удовлетворительные для насосов и некоторых ВЭУ
4	5,8...8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветви деревьев, на воде много барашков	Начинают вращаться колеса	Хорошие для ВЭУ
5	8,5...11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ – 30 % проектной	Очень хорошие
6	11...14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пениться гребни волн	Мощность близка к максимальной	Приемлемые для прочных малых ВЭУ
7	14...17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Максимальная мощность	Предельно допустимые
8	17...21	Очень крепкий	Ломаются ветви деревьев, трудно идти против ветра, с волн срывается пена	Ряд ВЭУ начинают отключаться	Недопустимые
9	21...25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Все ВЭУ отключаются	
10	25...29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем	Предельные нагрузки	
11	29...34	Жестокий шторм	Широкомасштабные разрушения	Повреждения некоторых ВЭУ	
12	>34	Ураган	Опустошительные разрушения	Серьезные повреждения ВЭУ	

Таблица П1-6 – Показатели установленной мощности ВЭУ по странам мира (по состоянию на 01.01.2005 г.; источник: «Энергия: экономика, техника, экология», 2005 год, № 8, С. 42–45)

Страна	Дополнительно введенная мощность в 2004 году, МВт	Индекс роста в 2004 году	Суммарная установленная мощность на 01.01.2005 года
Германия	2019,7	13,8	16 628,8
Испания	2061	33,2	8263
США	370	5,8	6740
Дания	7	0,2	3117
Индия	875	41,5	2985
Италия	221	24,4	1125
Нидерланды	170	18,7	1078
Япония	390,2	77,1	896,2
Великобритания	240	37	888
Китай	197	34,7	764
Австрия	191	46	606
Португалия	223	74,6	522
Греция	124	34	489
Канада	122	37,9	444
Швеция	43	10,8	442
Франция	138	55,6	386
Австралия	181,8	92,2	379
Ирландия	152,9	82,2	338,9
Египет	120	66,7	300
Норвегия	176	176	276
Мир в целом	8323,2	21,2	47 616,65

Таблица П1-7 – Суммарные установленные мощности по странам мира 2012-2017 гг. (источник: <https://www.sites.google.com/a/eeseaec.org/eeseaec/contact-us/obsie-obemnye-tehniko-ekonomiceskie-pokazateli/tr---3-1/ustanovlennaa-mosnost-vie> – дата обращения 27.12.2019 г.)

Страна	Мощность ВЭУ, МВт					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Германия	65 068	70 212	76 538	83 851	90 337	98 089
США	70 287	75 637	84 414	98 581	118 544	133 219
Индия	18 421	23 583	29 142	30 587	47 994	62 724
Дания	4564	5390	5494	5859	6097	6428
Китай	64 830	92 410	121 430	172 930	223 785	294 420
Италия	25 615	27 456	28 045	28 806	29 434	30 186
Великобритания	10 792	14 227	18 611	23 916	28 099	32 629
Португалия	4675	4931	5296	5408	5663	5733

Продолжение таблицы П1-7

Франция	12 153	13 763	15 382	17630	19 449	22 258
Нидерланды	2802	3459	3913	4906	6306	7106
Канада	6987	9031	11 557	13 751	14 655	15 336
Япония	9504	152 641	22 596	31 938	42 210	48 189
Австрия	1675	2302	2896	3427	3827	4157
Австралия	6361	7790	9085	10 181	11 017	12 171
Греция	3289	4388	4574	4695	4974	5230
Ирландия	1705	2009	2285	2453	2792	3334
Швеция	3630	4237	5148	5923	6588	6855
Норвегия	705	818	859	867	883	1207
Бразилия	1886	2207	4903	7654	10 215	13 390
Египет	687	687	687	687	887	887

Таблица П1-8 – Суммарные установленные мощности, МВт и прогноз WWEA до 2010 г. (WWEA- Всемирная Ветроэнергетическая ассоциация)

Год				
2001	2002	2003	2004	2005
24 320	31 164	39 290	47 686	59 004
Год				
2006	2007*	2008*	2009*	2010*
73 904	90 000	109 000	132 000	160 000

* – прогноз WWEA (всемирная Ветроэлектрическая ассоциация)

В Европе в 2005 году было сконцентрировано 69 % мировых мощностей. Италия, Великобритания и Япония имеют примерно по 1000 МВт установленных мощностей.

Около 20 % электричества Дании вырабатывается с помощью энергии ветра. Индия в 2005 года получает из энергии ветра около 3 % всей электроэнергии. Страны Евросоюза в 2005 году получают за счет энергии ветра около 3 % потребляемой электроэнергии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Для выбора конкретной ВЭУ, прежде всего, необходимо определить потребное количество электрической энергии, которое должна поставлять энергоустановка для полного удовлетворения всех бытовых и хозяйственных нужд.

С этой целью в качестве стандартного объекта энергопотребления принимается дом фермера, а все нагрузки однофазными (220В/50 Гц).

Типичные бытовые нагрузки для единичного потребителя: (до 5 кА): видеомэагнитофоны мэагнитофоны, приемники, холодильники и другие кухонные электроприборы (миксеры, небольшие электропечи, кипятильники, печи СВЧ, кофеварки, электрочайники, тостеры и т. п.), оргтехника (компьютеры, принтеры,, сканеры, ксероксы, телефоны, факсы и т. п.), ручной электроинструмент (дрели, электролобзики, электрорубанки и т. п.), другие бытовые электроприборы (пылесосы, фены, утюги, стиральные машины, вентиляторы, кондиционеры, электронагреватели небольшой мощности и т. п.), однофазное промышленное электрооборудования небольшой мощности (насосы, компрессоры, настольные освещение, теле- и аудиотехника (телевизоры, спутниковые антенны, станки и т. п.), электроприборы, приводимые в действие двигателя постоянного тока (холодильники, насосы, и т. п.).

Таблица П2-1 – Характеристики электропотребления

Наименование оборудования	Количество, шт	Мощность, Вт	Время работы в течение расчетного периода, ч	Расчетный период времени	Потребление за месяц, кВт·ч
Электролампа	6	60	7	Сутки	75,6
Телевизор	1	60	6	Сутки	10,8
Видеоплеер	1	10	7	Неделя	0,301
Музыкальный центр	1	100	3	Сутки	9
Компьютер	2	150	4	Сутки	18
Принтер	1	20	2	Неделя	0,172
Холодильник	1	150	24	Сутки	108
Печь СВЧ	1	1000	0,2	Сутки	6
Миксер	1	500	0,2	Сутки	3
Кофеварка	1	1000	0,2	Сутки	6
Стиральная машина	1	60	6	Сутки	10,8
Утюг	1	1500	1	Неделя	6,45
Пылесос	1	1400	1,5	Неделя	9,03
Электродрель	1	1000	0,5	Неделя	2,15
Фен	1	500	2	Неделя	4,3
Электронасос	1	1200	0,2	Сутки	7,2
Другие приборы	1	200	0,5	Сутки	3
Суммарное электропотребление в месяц:					260 кВт·ч

55

Чтобы чувствовать себя уверенно и комфортно, семье из 3-х человек, проживающих в загородном доме, расход Э-Э д.б. не менее 2 кВт·ч (по данным ЮНЕСКО).

**Таблица П2-2 – Характеристики электропотребления
(семья из 3-х человек)**

Потребитель	Часы использования, ч	Подключенная мощность, Вт	Всего кВт·ч/сут
Кухня	4	60	0,24
Гостиная	3,5	2×60	0,42
Спальня	3	60	0,18
Ванная	2	40	0,08
Туалет	1	40	0,04
Цветной ТВ	6	60	0,36
Компьютер	2	240	0,48
Насос	1,5	200	0,30
Холодильник	Круглосуточно	125	1,0
Всего в сутки: 3,1 кВт·ч			

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица ПЗ-1 – Основные технические данные о ВЭУ малой мощности (Россия)

Фирма-изготовитель	Тип (модель)	Диаметр ротора, м	Высота башни, м	Номинальная мощность, Вт	Расчетная скорость ветра, м/с	Количество лопастей, шт.
ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор»	УВЭ-500	2,2	4,5 (9,0)	500	10	3
ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор»	УВЭ-1500	3,1	12 (7,5)	1500	10	2
ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор»	УВЭ-300	2,2	4,3	550	8	3
ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор»	УВЭ-1000	3,3	8	1000	10	3
57 ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор»	УВЭ-40	1,5	4,0	40...100	6,5	3
ЛМВ Ветроэнергетика	ЛВВ-1003	2,5	6...18	1000	12	3
ЛМВ Ветроэнергетика	ЛВВ-2500	5	18...40	2500	12	3
ЛМВ Ветроэнергетика	ЛВВ-3600	5	18...40	3600	12	3
«Mechanix»	«Mechanix»-1500	3,6	6...18	1400	12	3
Государственное машино-строительное КБ «Радуга»	«Радуга-001»	4,8	8,0	1000	7,1	3
Государственное машино-строительное КБ «Радуга»	«Радуга-008»	10,0	9,5	8000	7,8	3

Продолжение таблицы ПЗ-1

Рыбинский завод приборостроения	«Шексна-1»			500	8,0	
Рыбинский завод приборостроения	«Шексна-2»			1000	8,0	
Рыбинский завод приборостроения	ВЕТЭН 0,16	1,6	не< 4,5	160	3,5...25	3
Рыбинский завод приборостроения	ВТН 8-6	8,45	12,3	8000	3,5...25	2
НПК «ВЕТРОТОК»	ВЭУ-16	6,5	10,0	16 000	17,5	2
НПК «ВЕТРОТОК»	ВЭУ-16	5,0	9,0	4200	4...25	24
ЗАО «ЭЛМОТРОН»	ВЭС-1	3,6	8,0	1000	8,0	3
ЗАО «ЭЛМОТРОН»	ВЭС-2	4,8	8,0	2000	8,0	3
АО «ДОЛИНА»	ВЭУ-2	3,6	8,0	2000	8,0	3
АО «ДОЛИНА»	ВЭУ-5	4,8	8,0	5000	8,0	3

Количество электроэнергии, вырабатываемой УВЭ-500, при средней скорости ветра:

- 5 м/с – 170 Вт×24 ч = 4,1 кВт×ч/сут
- 6 м/с – 200 Вт×24 ч = 4,8 кВт×ч/сут
- 7 м/с – 250 Вт×24 ч = 6,0 кВт×ч/сут

УВЭ-500 обеспечивает потребителей электроэнергии для питания ламп освещения, бытовых приборов, линий теле- и радиокommunikаций, устройств спутниковой и сотовой связи, компьютера, устройств бытовой и специальной связи, передвижных и стационарных пунктов навигационных и метеорологических постов, маяков и радиоприемников, медицинской и научной аппаратуры, водяных насосов для обеспечения зарядки аккумуляторов и т. д.

Таблица ПЗ-2 – Выработка электроэнергии установками ЛМВ и «Mechanix» – 1500 за один месяц, кВт·ч (высота мачты – 10 м)

Среднегодовая скорость ветра, м/с	ЛВВ-1003 (*)	ЛМВ-2500 (**)	ЛМВ-3600 (***)	«Mechanix»-1500 (**)
3	75	282	132	110
4	119	479	365	200
5	171	677	652	280
6	216	862	943	370
7	259	1019	1207	470

(*) – для районов с умеренными скоростями ветра;

(**) – для районов со слабыми скоростями ветра;

(***) – для районов с высокими скоростями ветра.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

СТОИМОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВЭУ

О современной ситуации в области снижения стоимости производства электроэнергии на базе НВИЭ дает таблица П 4–1, составленная по данным **Международного энергетического агентства (МЭА)**. Чтобы было удобнее сопоставлять, укажем, что стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на новых крупных газовых электростанциях, в среднем **составляет 1 цент**, а на малых дизельных установках достигает **10 центов**.

Таблица П4-1 – Динамика снижения стоимости производства электроэнергии на базе НВИЭ (по данным МЭА, 2000 г.)

Технология	Текущая стоимость произведенной электроэнергии, цент/кВт·ч	Снижение капитальных затрат за последние 10 лет, %	Ожидаемое снижение капитальных затрат в следующие 10 лет, %
Малые ГЭС	2...10	Постоянные	Слабое повышение
Биомасса, сжигание отходов	2...14	Некоторое повышение	Повышение
Биомасса, анаэробная ферментация	2...14	5...10	Слабое повышение
Биомасса, газ из отвалов	4...6	10...15	Слабое повышение
Биомасса, культивируемые энергетические культуры	8...15	10...15	30...50
Солнечные тепловые станции	10...25	50	25
Фотоэлектричество	50...150	40	40...50
Ветроэнергостановки	4...10	30...50	20...35

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П5-1 – Теплота сгорания различных видов топлива

Вид топлива	Единица	Теплота сгорания			
		ГДж	МВт·ч	т у.т.	т н.э.
Нефтяной элемент	т	41,868	11,630	1,42857	1,0000
Мазут	т	40,61	11,281	1,38565	0,9700
Бензин	т	43,09	11,969	1,47027	1,0292
Сжигаемый газ	т	45,61	12,669	1,55625	1,0894
Каменный уголь	т	25,24	7,094	0,87145	0,6100
Условное топливо	т	29,31	8,141	1,00000	0,7000
Топливная древесина смешанных пород	склад, м ³	4,51	1,253	0,15388	0,1077
Природный газ	1000 м ³	36,00	10,000	1,22835	0,8598

С учетом данных таблицы П5-1 ниже (см. таблицу П5-2) приводится стоимость в рублях 1 т у.т., если известна закупочная цена барреля нефти (средняя объемная масса нефти 0,87 т/м³) или закупочная цена 1000 м³ природного газа.

Таблица П5-2 – Стоимость 1 т у.т. в зависимости от закупочной цены углеводородного топлива

Стоимость, руб.			
1 баррель нефти	1 т у.т.	1000 м ³ природного газа	1 т у. т.
20	101	100	81
25	127	150	122
30	152	200	163
40	202	250	204
50	253	300	244
60	304	350	285
70	354	400	326

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ СТАНЦИИ (ДЭС)

Затраты на получение электрической энергии от ДЭС складываются из следующих составляющих:

1. Капитальные вложения в приобретение ДЭС (см. табл. 6 П–1);
2. Эксплуатационные издержки, в которые входят:

- расходы на капитальный ремонт, согласно [17] при работе только ДЭС (без ВЭУ) соответствующие расходы составляют 50 400 руб. в год;

- расходы на техническое обслуживание (через 50 ч непрерывной работы ДЭС требуется остановка дизеля, технический осмотр, замена масла и смазка узлов), что составляет 84 000 руб. в год [17];

- расходы на закупку дизельного топлива ($C_{\text{топ}}$) от 8 руб./кг (2004, [17]) до 16 руб./кг (2006).

В технико-экономических расчетах следует учитывать фактическое время работы ДЭС, для этого надо знать коэффициент использования установленной мощности ($k_{\text{ис}}^{\text{ДЭС}}$) энергоустановки, который для ДЭС обычно составляет 0,8.

Необходимые сведения технико-экономических показателей ДЭС российского производства приведены в таблице.

Таблица Пб-1 – Технико-экономические показатели

Наименование	Мощность, кВт	Стоимость, руб.	Расход топлива q_r , кг/ч	Ресурс, ч.
АД-4-Т400	4	45 400	1,7	4000
АД-6-Т400	6	82 320	2,3	5000
АД-8-Т400	8	91 950	2,6	5000
АД-10-Т400-1В	10	166 850	2,6	10 000
АД-16С-Т400-1В	16	187 822	5,0	10 000
АД-20-Т400-1В	20	198 950	6,0	10 000
АД-30-Т400	30	209 650	8,0	10 000

*Сведения из сайтов www.megadomo.ru, www.Disel-status.ru

Так как в учебном пособии рассматривается комбинированная энергетическая установка ВЭУ(+ДЭС), в технико-экономических расчетах следует учитывать фактическое время работы ДЭС.

Пример расчета. ВЭУ дополнен ДЭС АД-8-Т400 (см. таблицу 6 П-1). Установленная мощность ДЭС составляет 8 кВт ($N_{УСТ}^{ДЭС}$). Стоимость топлива $C_{ТОП} = 8$ руб/кг, общее время работы ДЭС, если ВЭУ работает в течение года 340 суток ($t = 340$ сут.), $t_{ДОП}^{ДЭС} = 365 - \tau = 365 - 340 = 25$ сут. Фактическое время работы ДЭС, если $k_{ИСП}^{ДЭС} = 0,8$:

$$t_{ФАК}^{ДЭС} = k_{ИСП}^{ДЭС} \times t_{ДОП}^{ДЭС} = 0,8 \times 25 = 20 \text{ сут.} = 480 \text{ ч.}$$

Главные экономические показатели:

- капитальные вложения в приобретение ДЭС – 217 000 руб.;
- стоимость капремонта – $C_{РЕМ}^{ДЭС} = 50\,400 \times 25 / 365 = 3452$ руб.;
- стоимость техобслуживания $C_{ТО}^{ДЭС} = 84\,000 \times 25 / 365 = 5753$ руб.;
- стоимость топлива

$$C_{ТОП}^{ДЭС} = q_T t_{ФАК}^{ДЭС} \left(\frac{8}{30} \right) = 2,6 \times 480 \left(\frac{560}{30} \right) = 23\,296 \text{ руб.}$$

Всего эксплуатационные издержки составят

$$И_{ЭК}^{ДЭС} = C_{РЕМ}^{ДЭС} + C_{ТО}^{ДЭС} + C_{ТОП}^{ДЭС} = 3452 + 5753 + 23\,296 = 32\,501 \text{ руб.}$$

Таблица 6П-2 – Список реализованных проектов на основе ВЭС+ДЭС

Расположение	ВЭС	ДЭС
о. Беринга (Камчатский край)	550 кВт (две Vergnet GEV-C установленной мощностью 275 кВт каждая)	1168 кВт
пос. Усть-Камчатск (Камчатский край)	275 кВт (одна Vergnet GEV-C установленной мощностью 275 кВт, в исполнении для холодного климата); вторая очередь – ВЭС 900 кВт (три ВЭУ Komai KWT 300, установленной мощностью 300 кВт каждая)	8 МВт
пос. Новиково (Сахалинский край)	ВЭС 450 кВт (две ВЭУ 225 кВт реновированный Vestas)	Нет данных
Республика Татарстан	ВЭС Ghrepower FD 12-30/11 установленной мощностью 30 кВт	Нет данных
пос. Амдерма (Ненецкий автономный округ)	200 кВт (четыре ВЭУ арктической версии Ghrepower – 50 мощностью 50 кВт каждая)	800 кВт

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Бланк задания

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

ИНСТИТУТ МЕЛИОРАЦИИ, ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И СТРОИТЕЛЬСТВА имени А. Н. КОСТЯКОВА

КАФЕДРА КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ГИДРАВЛИКИ

Дисциплина «Возобновляемые источники энергии»
Расчетно-графическая работа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Студент _____ курс _____ группа _____
Индивидуальное задание № _____, шифр задания _____

Варианты индивидуальных заданий:

	Параметры	1	2	3	4
А	Количество потребителей электроэнергии (крестьянских дворов) в населенном пункте, M_{Π} водопотребителей	10	15	20	25
В	Норма выработки электроэнергии (n_{Π}) в расчете на одного потребителя за год, кВт·ч в год	3950	3050	2150	1600
С	Общее время работы ВЭУ за год (τ), сут.	305	315	325	335
А	Средняя скорость ветра за время работы ВЭУ (V_{cp}), м/с	4,8	4,9	5,0	5,1
В	Коэффициент мощности ВК ВЭУ (C_p), доли ед.	0,38	0,39	0,41	0,43
С	Удельные капитальные вложения в 1кВт установленной мощности ВЭУ ($\kappa_n^{ВЭУ}$), долл./кВт	1050	1075	1125	1150
А	Удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ТЭС ($\kappa_n^{ТЭС}$), долл./кВт	550	575	600	625
В	Расчетная скорость ветра, обеспечивающая установленную мощность, ВЭУ, (V_p), м/с	8,3	8,1	8,2	8,0
С	Стоимость ед. условного топлива (P_T), долл./т у.т.	212	217	223	227

Номера и шифры индивидуальных заданий:

1	A3,B4,C3	16	A1,B4,C2
2	A1,B2B4,	17	A3,B4,C1
3	A2,B4,C3	18	A3,B4,C2
4	A1,B3,C2	19	A4,B1,C2
5	A4,B1,C3	20	A2,B1,C4
6	A4,B1,C4	21	A4,B2,C1
7	A2,B1,C3	22	A3,B2,C1
8	A3,B1,C4	23	A4,B3,C1
9	A2,B4,C1	24	A4,B3,C2
10	A1,B3,C4	25	A1,B4,C3
11	A3,B2,C4	26	A2,B3,C4
12	A4,B2,C3	27	A3,B1,C3
13	A3,B1,C2	28	A4,B3,C3
14	A4,B2,C2	29	A3,B2,C2
15	A2,B3,C1	30	A1,B2,C3

В соответствии с заданными исходными требуется определить:

- 1. Количество электроэнергии, которое необходимо поставить изолированному потребителю.*
- 2. Количество электроэнергии, поступающей от ВЭУ.*
- 3. Требуемую установленную мощность ВЭУ.*
- 4. Диаметр ветроколеса.*
- 5. Высоту башни ВЭУ.*
- 6. Годовую экономию условного топлива.*
- 7. Размер предотвращенной эмиссии углекислого газа.*
- 8. Срок окупаемости инвестиций в устройство ВЭУ(+ДЭС).*
- 9. Рекомендуемые к эксплуатации марки ВЭУ и ДЭС.*

Примечание: *показать конструктивные размеры на эскизном чертеже ВЭУ.*

Исходные данные выданы (дата) _____

Срок исполнения: _____

Преподаватель: _____

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $N_{\text{УСТ}}^{\text{ВЭУ}}$ – установленная мощность;
- $N_{\text{П}}^{\text{ВЭУ}}$ – средняя развиваемая мощность, *кВт*;
- $N_{\text{УСТ}}^{\text{ДЭС}}$ – установленная мощность дизель-генераторной станции (ДЭС), *кВт*;
- $E_{\text{С}}^{\text{П}}$ – годовая потребность в электроэнергии всех потребителей данного населенного пункта, *кВт·ч за год*;
- τ – общее время работы ВЭУ в течение года, *ч/год*;
- $E_{\text{С}}^{\text{ВЭУ}}$ – энергопотребление за счет ВЭУ, *кВт·ч за время τ (сут., год)*;
- $v^{\text{ТЭС}}$ – удельный расход топлива для традиционной установки, *т/год*;
- $B^{\text{ТЭС}}$ – годовая экономия условного топлива, *т у.п.*;
- $V_{\text{УГ}}^{\text{ВЭУ}}$ – объем предотвращенной эмиссии углекислого газа, *т/год*;
- n_0 – удельная мощность ветрового колеса, которая приходится на 1 м^2 площади, «ометаемой» ветроколесом (ВК), *Вт/м²*;
- $e_{\text{С}}$ – среднегодовая удельная выработка электроэнергии на 1 м^2 «ометаемой» площади ВК, *кВт·ч/м² в год*;
- D – диаметр ВК, *м*;
- H – высота башни ВЭУ, *м*;
- $\Delta E_{\text{С}}^{\text{ДЭС}}$ – электроэнергия, вырабатываемая заменяющей ВЭУ энергоустановкой (ДЭС), *кВт·ч в год*;
- $k_{\text{С}}^{\text{ВЭУ}}$ – тариф электрической энергии, вырабатываемой для нужд потребителя, *руб./кВт·ч*;
- $k_{\text{н}}^{\text{ДЭС}}$ – удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭУ, *руб./кВт*;
- $k_{\text{н}}^{\text{ТЭС}}$ – удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности традиционной энергоустановки, *руб./кВт*;
- $T_{\text{ОК}}^{\text{ВЭУ}}$ – срок окупаемости капитальных вложений в устройство комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), *лет*;
- $T_{\text{ОК}}^{\text{ТЭС}}$ – срок окупаемости капитальных вложений в устройство традиционной установки, *лет*;
- $T_{\text{ОК}}^{\text{ПР}}$ – предельно допустимые (нормативный) нормативный срок окупаемости капитальных вложений, *лет*;

$K_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$ – капитальные вложения в устройство ВЭУ, руб.;
 $K_{\Pi}^{\text{ДЭС}}$ – капитальные вложения в устройство ДЭС, руб.;
 $\sum K_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}$ – общие капитальные вложения в устройство комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), руб.;
 $K_{\Pi}^{\text{ТЭС}}$ – капитальные вложения в устройство традиционной энергоустановки, руб.;
 $I_{\text{ЭК}}^{\text{ВЭУ}}$ – эксплуатационные издержки при работе ВЭУ, руб./год;
 $I_{\text{ЭК}}^{\text{ДЭС}}$ – эксплуатационные издержки при работе ДЭС, руб./год;
 $\sum I_{\text{ЭК}}$ – общие эксплуатационные издержки при работе комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), руб.;
 $\text{Э}_{\text{Ф}}^{\text{СУМ}}$ – суммарный годовой экономический эффект при совместной работе комбинированной ветроэлектрической установки ВЭУ(+ДЭС), руб.;
 ΔC_{T} – удельная экономия затрат на топливе при отказе от энергоустановки, работающей на традиционном топливе, в пользу установки, использующей ВЭУ, руб./кВт·ч;
 $\Delta k^{\text{ПР}}$ – предельно допустимые удельные капитальные вложения в единицу продукции комбинированной ВЭУ, руб./кВт·ч;
 $K_{\Pi}^{\text{ПР}}$ – предельно допустимые общие капитальные вложения в устройство комбинированной ВЭУ, руб.;
 λ – норма издержек эксплуатации ВЭУ, 1/год;
 n – Нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений, доли ед.;
 M_{Π} – количество потребителей электроэнергии (крестьянских дворов) в населенном пункте, ед. потребителей;
 n^{Π} – норма выработки электроэнергии на одного потребителя, кВт·ч/год;
 $V_{\text{СР}}$ – средняя скорость ветра за время работы ВЭУ, м/с;
 $V_{\text{Р}}$ – расчетная скорость ветра, при которой обеспечивается установленная (нормативная) мощность ВЭУ, м/с;
 $C_{\text{Р}}$ – коэффициент мощности ветроколеса (ВК), доли ед.;
 P_{T} – стоимость единицы условного топлива, долл./ т у.т.;
 $B^{\text{ТЭС}}$ – потребность в топливе при работе традиционной энергоустановки, т у.т.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дж. Твайделл, А. Уэйр.** Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
2. **Беляев Ю. М.** Концепция альтернативной экологически безопасной энергетики. Краснодар : «Сов. Кубань», 1998. 64 с.
3. **Ревель П., Ревель Ч.** Среда нашего обитания: В 4-х книгах. Кн. 3. Энергетические проблемы человечества: Пер. с англ. М. : мир, 1995. 291 с.
4. Использование возобновляемых источников энергии в России (Российский Национальный доклад) // Энергия: экономика, техника, экология. 1996. № 11. С. 3–11.
5. **Безруких П. П., Безруких П. П. (мл)** Что может дать энергия ветра? // Энергия: экономика, техника, экология, 2000. № 1. С. 11–17. № 2. С. 13–24.
6. **Безруких П. П.** Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России: [Монография] / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов и [др.]; под общ. ред. П. П. Безруких; М-во энергетики Рос. Федерации [и др.]. СПб. : Наука, 2002. С. 313.
7. Концепция использования ветровой энергии в России / Ком. Рос. Союза науч. и инженер. обществ. орг. по проблемам использования возобновляемых источников энергии, ЗАО «НТЦ Новые и возобновляемые источники энергии», НТЦ малой энергетики ОАО «НИИЭС»; под ред. Безруких П. П. М. : Книга-Пента, 2005 (ОАО Можайский полигр. комб.). 127 с.
8. Экологический энциклопедический словарь М. : Издательский дом «Ноосфера», 1999. 930 с.
9. **Безруких П. П., Стребков Д. С.** Возобновляемая энергия: стратегия, ресурсы, технологии. М. : ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264 с.
10. Оборудование нетрадиционной и малой энергетики: Справочник-каталог / Министерство топлива и энергетики РФ; АО «Новые и возобновляемые источники энергии»; гл. ред. Ю.Д. Арбузов. М. : ВИЭН, 2000. 168 с.
11. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. ИСЦ. М. : 2001. 62 с.
12. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов. / М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, Гк по стр-ву, архит. и жил.

политике; рук. Авт. кол.: Косов В. В., Ливцин В. Н., Шахназаров А. Г. М. : «НПО» «Экономика», 2000. 2-я ред. 421 с.

13. **Виленский П. Л., Ливцин В. Н., Смоляк С. А.** Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: Учеб. Пособие. 2-я изд., перераб. и доп. М. : Дело, 2002. 888 с.

14. **Харитонов В. П.** Автономные ветроэлектрические установки. М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.

15. Возобновляемая энергия (Ежеквартальный информационный бюллетень). Ветроэнергетика в России, 2000 г. декабрь, 5 с.

16. Новый политехнический словарь. М. : Большая Российская Энциклопедия, 2000. 671 с.

17. **Кашфразиев Ю. А.** Ветроэнергетические установки в России – роскошь или источник энергии? // Энергия: экономик, техника, экология. 2004. № 10. С. 35–39.

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

19. Ежегодный статистический отчет Renewable Capacity Statistics 2020 / Международное агентство возобновляемой энергетики (IRENA).

20. **Безруких П. П.** Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. М. : Колос, 2008. 196 с.

21. **Безруких П. П.** Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов / П. П. Безруких, П. П. Безруких (мл.). М. : Институт устойчивого развития Общественной палаты РФ; Центр экологической политики России, 2011. 74 с.

22. **Баскаков А. П., Мунц В. А.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Учебник. М. : Издательский Дом «БАСТЕТ», 2013. 368 с.

23. **Алхасов А. Б.** Возобновляемые источники энергии / [б. м.] Издательский дом МЭИ, 2011. 272 с.

24. **Федоренко В. Ф., Тихонравов В. С., Мишуров Н. П.** Возобновляемые источники энергии: тенденции и перспективы развития: научный аналитический обзор. М. : Росинформагротех, 2015. 126 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Использование энергии ветра для хозяйственных и бытовых целей в современных условиях.....	7
1.1. Общая характеристика использования энергии ветра.....	7
1.2. Малые и комбинированные ветроэнергетические системы как источник.....	13
2. Теоретические основы и практические методы определения энергетических и конструктивных параметров ВЭУ.....	16
3. Определение основных энергетических и конструктивных параметров ВЭУ.....	23
3.1. Основные энергетические параметры ВЭУ.....	24
3.2. Основные конструктивные параметры ВЭУ.....	24
3.3. Методика определения основных энергетических и конструктивных параметров ВЭУ.....	25
4. Оценка экономической эффективности инвестиций в устройства ВЭУ.....	29
4.1. Основные технико-экономические показатели эффективности устройства комбинированной ВЭУ.....	32
4.2. Методика определения технико-экономических показателей эффективности устройства комбинированной ВЭУ.....	33
5. Определение основных параметров ветроэлектрической установки и оценка экономической эффективности инвестиции в ее устройство (пример расчета).....	38
5.1. Расчет энергетических и конструктивных параметров комбинированной ветроэлектрической установки (ВЭУ).....	39
5.2. Оценка экономической эффективности инвестиций в устройство комбинированной ветроэлектрической установки (ВЭУ).....	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	64
Условные обозначения.....	66
Библиографический список.....	68

Учебное издание

Бакштанин Александр Михайлович
Матвеева Татьяна Ивановна
Соколова Светлана Анатольевна

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Оригинал-макет *Алексей Карев*

Дизайн обложки *Полина Шапошникова*

Подписано в печать 06.08.2020. Формат 60x90/16
Усл.-печ. л. 4,44. Тираж 100 экз. Заказ № 96

ООО «Мегаполис»
www.m-megapolis.ru
Тел.: 8 (495) 643-28-71
E-mail: zakaz@m-megapolis.ru
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5