

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

П.П. Безруких

Ветроэнергетика

(Справочное и методическое пособие)

Москва 2009 г.

П.П. Безруких

Ветроэнергетика

(Справочное и методическое пособие)

**Москва
2010**

УДК 621.47

ББК 31.63

Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: – ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с.

ISBN 978-5-98908-032-8

В книге рассмотрено современное состояние ветроэнергетики мира, динамика и перспективы ее развития. Изложены теоретические основы ветроэнергетики. Приведены основные особенности режимов работы ВЭУ и ВЭС. Приведены описания конструкций различных типов ВЭУ и схемы главных соединений ВЭУ и ВЭС. Даны текущие и перспективные оценки удельной стоимости установленной мощности и вырабатываемой электрической энергии и их зависимость от различных факторов.

Подробно проанализированы и оценены виды воздействия ВЭУ на среду обитания человека, по сравнению с электростанциями на различных видах органического топлива. Даны ответы на часто возникающие вопросы по различным разделам ветроэнергетики. В книге содержится большой справочный материал по технико-экономическим характеристикам современных ВЭУ малой и большой мощности.

Книга рассчитана на широкий круг читателей от сельских электриков до экономистов и экологов, проектировщиков ВЭС.

ISBN 978-5-98908-032-8

© Безруких П.П., 2010

© ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящую книгу можно назвать пособием для тех руководителей и специалистов разного уровня органов управления субъектов Российской Федерации, а также общественных деятелей, которые в условиях дефицита топлива и бюджетных средств заняты поиском решений проблемы надежного энергоснабжения и потребителей на подведомственных территориях, в первую очередь находящихся в зонах децентрализованного энергоснабжения, а также в зонах дефицитных энергосистем, подверженных ограничительным и/или аварийным отключениям.

Она является также пособием для предпринимателей, фермеров и любых частных лиц, которые ищут самостоятельно пути снижения расходов на оплату электроэнергии и обеспечения бесперебойного энергоснабжения своих предприятий.

Книга полезна людям, занимающимся сезонными работами (геологи, рыбаки, охотники, скотоводы, огородники и т.п.), живущими, как правило, без радио, телевидения и электрического освещения, а также всем, кто интересуется использованием энергии ветра.

Вместе с тем автором предпринята попытка сделать книгу учебным пособием для студентов, специализирующихся в области использования возобновляемых источников энергии, а также проектировщиков ветростанций. В связи с этим в книгу включены основные формулы по ветроэнергетики, а также большой справочный материал по современным зарубежным и отечественным ветроустановкам.

Книга написана, в основном на базе изучения опыта строительства и эксплуатации ветроустановок и ветростанций за рубежом (по этой причине все стоимостные данные приводятся в долларах или евро), а также анализа всего, что делается в России по этой проблеме.

Книга является вторым дополненным и переработанным изданием книги «Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология», изданным в издательстве «Колос» в 2008 году. В первое издание не вошел значительный справочный материал, касающийся технических характеристик ветроэнергетических установок большой мощности. В настоящее издание этот материал включен и может быть использован при курсовом и дипломном проектировании. Приведены данные о состоянии ветроэнергетики в странах мира за период 1980 – 2008 годы. Имеются существенные дополнения и по другим главам книги.

Автор выражает глубокую благодарность В.Н.Пузакову, оказавшему большую помощь в сборе материалов и подготовке рукописи к изданию.

Автор

ГЛАВА 1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ

1.1. От древности до конца XIX века

Энергия ветра использовалась человеком с древнейших времён. Сначала в мореплавании вплоть до появления паровой машины, заменившей паруса на судах.

Но и ветроэнергетика имеет многовековую историю. По данным М.В. Колодина и Я.И. Шефтера первые простейшие ветродвигатели применяли в глубокой древности в Египте и Китае. В Египте около г. Александрия до сих пор сохранились остатки каменных ветряных мельниц, барабанного типа с вертикальной осью вращения, построенные еще во 2-1 веках до н.э. В 7 веке н.э. в Персии (Иране) были построены более совершенные конструкции – крыльчатые с горизонтальной осью вращения. Несколько позднее, видимо в 8-9 веках ветряные мельницы появились в Западной Европе и на Руси. Начиная с 13 века ветродвигатели получили широкое распространение в Голландии, Дании, Англии и России для подъёма воды, размола зерна и в качестве привода различных станков и механизмов. По другим данным (D.J. de Renzo) в XI в. ветряные мельницы широко использовались на Ближнем Востоке и попали в Европу в XIII в. при возвращении крестоносцев. В средние века в Европе многие поместные права, включая и право отказа в разрешении на строительство ветряных мельниц, вынуждали арендаторов иметь площади для посева зерна около мельниц феодальных поместий. Посадки деревьев вблизи ветряных мельниц запрещались для обеспечения “свободного ветра”.

В XIV в. голландцы стали ведущими в усовершенствовании конструкций ветряных мельниц и широко использовали их с этого времени для осушения болот и озёр в дельте р. Рейн. Между 1608 и 1612 гг. польдер Беёмстер (лольдеры – низменные места, которые предполагается осушить) находившийся на три метра ниже уровня моря, был осушен с помощью 26 ветродвигателей мощностью 37 кВт каждый.

В 1582 г. в Голландии была построена первая маслобойня, использующая энергию ветра, через 4 года – первая бумажная фабрика, которая удовлетворяла повышенные требования к бумаге, обусловленные изобретением печатной машины. В конце XVI в. появились лесопильные заводы для производства лесоматериалов, импортируемых из прибалтийских стран на которых использовались ветроустановки. В середине XIX в. в Голландии использовалось для различных целей около 9 тыс. ветродвигателей.

В период промышленной революции с введением паровых двигателей использование энергии ветра в Голландии пошло на убыль. В начале XX в. здесь работало только около 2,5 тыс. ветродвигателей, а к 1960 г. менее 1 тыс. из них все еще находились в рабочем состоянии.

Голландцы внесли много усовершенствований в конструкцию ветряных мельниц и, в частности, ветроколеса. В XVI в. примитивные поперечные паруса на деревянных полках уступили место парусам, закрепленным на деревянных брусках с двух сторон маха. Позже для улучшения аэродинамической формы лопасти бруски были присоединены к её задней кромке. В более современных конструкциях паруса были заменены тонким листовым металлом, использовались стальные махи и различные типы жалюзи и щитков для регулирования частоты вращения ветроколеса при больших скоростях ветра. Крупные ветряные мельницы заводского изготовления при больших скоростях ветра могли развивать мощность до 66 кВт.

1.2. Развитие ветроэнергетики за период: XIX в – 80-е годы XX века

США. К середине XIX в. США было построено более 6 млн. малых ветродвигателей с единичной мощностью до 0,75 кВт, которые использовались для выработки электрической энергии, подъема воды и выполнения других работ.

Для подъема воды обычно использовались ветродвигатели с цельнометаллическими ветроколесами диаметром 3,7-4,9 м, вращающимися на горизонтальном валу и снабженные хвостовым оперением для ориентации ветроколеса по направлению ветра. Вал соединяется системой передач со штангой, которая совершает возвратно-поступательные движения и приводит в действие насос, установленный у основания башни. Ветроколесо такого типа диаметром 3,7 м развивает мощность около 120 Вт при скорости ветра 6,7 м/с и может поднять 160 л/мин воды на высоту около 7 м.

ВЭУ небольшой мощности выполняются обычно с двух- или трехлопастным ветроколесом крыльчатого типа, соединенным через редуктор с генератором постоянного тока. Они снабжаются также системой аккумулялирования энергии, чаще всего аккумуляторной батареей. Многие ветронасосные установки используются до настоящего времени на западе США для целей водоснабжения в некоторых отдаленных местностях. Однако большинство ВЭУ были вытеснены начиная с 1930 г. энергосистемой, обеспечившей централизованным электроснабжением большинство ферм США.

Наибольшей действующей ВЭУ была установка “Смит-Путмэн”. После длительных исследований по влиянию размеров ВЭУ на ее эффективность, проведенных в 1930 г., Путмэн пришел к выводу, что для получения минимальной стоимости вырабатываемой электрической энергии требуются ВЭУ больших размеров. При участии известного аэродинамика Кармана и ряда сотрудников MIT он разработал ветродвигатель большой мощности для выработки энергии с целью питания существующей электросети Central Vermont Public Service

Company. Фирма S. Morgan Smith Company (г. Йорк, Пенсильвания) спроектировала и испытала в работе установку в начале 1940 г. Двухлопастное ветроколесо крыльчатого типа диаметром 53 м и массой 16 т развивало мощность 1,25 МВт при расчетной частоте вращения 28 об/мин.

В марте 1945 г. после периодической работы в течение нескольких лет одна из лопастей получила повреждение у втулки, где предварительно отмечались определенные деформации, которые не смогли быть устранены вследствие нехватки материалов в условиях военного времени. Всесторонние экономические исследования показали, что ВЭУ в случае ее восстановления в то время не могла конкурировать с электрическими установками обычного типа. Поэтому от ее дальнейших исследований отказались.

Дания. В конце XIX в. в Дании было около 3 тыс. ветродвигателей, которые использовались в промышленности, и около 30 тыс. ветродвигателей других типов, применявшихся для бытовых целей. Общая их мощность составляла около 200 МВт. В 1890 г. правительство Дании приступило к проведению широкой программы развития ВЭУ большой мощности. В 1910 г. было построено несколько сотен таких ВЭУ. Они имели четырехлопастные ветроколеса диаметром 23 м, установленные на башне высотой 24 м и соединенные механической передачей с электрическим генератором, расположенным у основания башни. Расчетная мощность генератора изменялась от 5 до 25 кВт.

В периоды первой и второй мировых войн энергия, вырабатывавшаяся ВЭУ такого типа, покрывала лишь небольшую часть потребности страны в электроэнергии. В этот период было установлено, что стоимость электроэнергии, вырабатываемой ими, примерно равна эквивалентной стоимости топлива, потребляемого дизельной электрической установкой.

После второй мировой войны датчане разработали и испытали три экспериментальные ВЭУ с установленной мощностью 12, 45 и 200 кВт, предназначенные для работы в энергосистеме. Они успешно эксплуатировались до 1960 г. Разработка проекта была приостановлена, когда выяснилось, что стоимость вырабатываемой электроэнергии примерно вдвое превышала в то время эквивалентную стоимость энергии теплового двигателя.

Великобритания. В конце 40-х и в течение 50-х годов значительные работы по созданию ВЭУ проводились в Великобритании. Измерения характеристик ветра были проведены в этот период в 100 местах на Британских островах.

В 1950 г. компания Vorth Scotland Hydroelectric Board провела разработку экспериментального ветродвигателя, установленного на Оркнейских островах. ВЭУ была рассчитана на мощность 100 кВт при скорости ветра 15,6 м/с. Она работала непродолжительное время в 1955 г. совместно с дизельной электростанцией, но использование ее было прекращено из-за трудностей, возникших при эксплуатации.

В 1950 г. фирма Enfield Cable Company разработала оригинальные ВЭУ типа Андро мощностью 100 кВт и установила их в Великобритании и в Алжире. Установка имела полую башню высотой 26 м и ветроколесо диаметром 24 м с пустотелыми лопастями, снабженными выходными отверстиями на концах. За счет возникающего перепада давлений воздух, поступающий через отверстия у осно-

вания башни, перемещается вдоль башни через расположенную турбину и выбрасывается через отверстия на концах лопастей. Установлено, что эффективность ВЭУ с пневматической передачей мощностей мала по сравнению с установками, снабженными ветроколесами обычного типа с горизонтальной осью вращения.

Франция. В период 1958–1966 гг. во Франции построено и работало несколько крупных ВЭУ. К ним относятся три установки с горизонтальной осью вращения трехлопастного ветроколеса крыльчатого типа, которые работали близ Парижа с перерывами с 1958 по 1963 г. Первая из них была рассчитана на мощность 800 кВт при скорости ветра 16,5 м/с. Ветроколесо диаметром 30 м, генератор и система передач общей массой 160 т были размещены на башне высотой 30 м. ВЭУ была снабжена синхронным генератором напряжением 3 кВ с частотой вращения 1000 об/мин при постоянной частоте вращения ветроколеса 47 об/мин и работала на общую сеть 50 Гц, 60 кВ. напряжение повышалось до 60 кВ с помощью трансформатора, соединенного с сетью линией длиной 15 км.

Две другие установки были сооружены на юге Франции. Меньшая из них с ветроколесом диаметром 21 м и частотой вращения 56 об/мин работала с асинхронным генератором с номинальной частотой вращения 1539 об/мин и развивала мощность 132 кВт при скорости ветра $v \geq 12,5$ м/с. Большая из ВЭУ с расчетной мощностью 1000 кВт при скорости ветра 16,5 м/с имела массу 97 т (вместе с башней). Удельная стоимость первой из ВЭУ составила 1155 долл./кВт, в то время как установки на юге – 1000 дол./кВт (в ценах 1960 г.). Во Франции было также построено и испытано в этот период несколько экспериментальных установок с вертикальной осью вращения.

Германия. Под руководством Хюттера в ФРГ был проведен ряд усовершенствований ВЭУ, в том числе легких ветроколес с постоянной частотой вращения и системой регулирования поворотом лопастей. Для ветродвигателей использовались легкие стеклопластиковые и пластиковые лопасти; генератор устанавливался на башне из пустотелой трубы небольшого диаметра, укрепленной проволочными оттяжками. Наибольшая из ВЭУ, развивавшая 100 кВт при скорости ветра 8 м/с, успешно работала в период 1957–1968 гг. Разработки нашли применение в некоторых наиболее совершенных ветродвигателях, строящихся до настоящего времени.

Конструкции стеклопластиковых лопастей, установленных на небольших опорах, и возможные повреждения лопастей исследовались в других странах на ветродвигателях больших размеров.

Россия и Советский Союз. До Великой Октябрьской социалистической революции в крестьянских хозяйствах России насчитывалось около 250 тыс. ветряных мельниц, которые ежегодно перемалывали половину урожая (около 33 млн т, или 2 млрд пудов зерна). С изобретением паровых машин, а затем двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей старые примитивные ветряные двигатели и мельницы были вытеснены из многих отраслей и остались главным образом в сельском хозяйстве. В начале XX в русский ученый Н.Е. Жуковский разработал теорию быстроходного ветродвигателя и заложил науч-

ные основы создания высокопроизводительных ветродвигателей, способных более эффективно использовать энергию ветра. Они были построены его учениками после организации в 1918 году Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). Советские ученые и инженеры теоретически обосновали принципиально новые схемы и создали совершенные по конструкции ветроэнергетические установки и *ветроэлектрические станции* (ВЭС) различных типов мощностью до 100 кВт для механизации и электрификации процессов сельскохозяйственного производства и других целей. Большие заслуги в создании основ ветроэнергетики имеют советские учёные и специалисты Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, Р.В. Секторов, К.П. Вашкевич, В.В. Сидоров и др. Промышленный выпуск электродвигателей для механического привода машин был налажен в начале XX в, а электрических ветроагрегатов с генераторами небольшой мощности – примерно в 20-годах.

В 1937 году вблизи Ялты была построена усовершенствованная ВЭС мощностью 100 кВт, находящейся от нее на расстоянии 32 км. Годовая выработка энергии составляла около 280 тыс. кВт·ч при коэффициенте использования энергии ветра 0,32. Генератор и регулирующие устройства были установлены на вершине башни высотой 30 м. Частота вращения ветроколеса регулировалась путем поворота лопастей. Башня имела наклонную опору, установленную на тележке, которая перемещалась по кольцевой направляющей для ориентации ветроколеса на ветер.

ВЭС была сооружена по проекту первопроходцев советской промышленной ветроэнергетики (Н.В. Красовский, В.В. Уткин-Егоров, Р.В. Секторов, Г.Х. Сабинин), а конструкция башни принадлежит выдающемуся энциклопедически образованному инженеру России В.Г. Шухову (1853-1939 гг.). ВЭС успешно проработала 3 года вплоть до её разрушения во время Великой Отечественной войны в конце 1941 г.

Одновременно в 30-х годах в Советском Союзе рассматривался проект создания ветроэлектрической системы мощностью 5 МВт, но он не был реализован.

В 40-50 годах XX века в СССР получило интенсивное развитие строительство ВЭС. В этот период было налажено серийное производство специализированных и универсальных ветродвигателей мощностью от 0,7 до 11 кВт (от 1 до 15 л.с.), главным образом с механическими и электрическими трансмиссиями. В послевоенный период было выпущено более 40 тыс. ветродвигателей, в основном типов ТВ-8, ТВ-5, ТВ-12, ВЭ-2, которые с большой эффективностью применялись в колхозах и совхозах.

К концу 60–х годов XX века в СССР были созданы новые типы более совершенных унифицированных быстроходных ветроэнергетических агрегатов (ВБЛ-3, ВПЛ-4, “Беркут”, “Ветерок” и др.), в которых использовались новые типы насосов и генераторов, пневматические, электрические и др. виды приводов, более совершенные системы регулирования. Большинство ветродвигателей применялись для механизации подъема воды, особенно на пастбищах и отдельных фермах в Поволжье, на Алтае и Чёрных землях, в Казахстане, Туркменинии, Узбекистане и других зонах, где они работали 250-300 дней в году. Разра-

ботка теоретических основ и создание новых конструкций ветроэнергетических агрегатов различного назначения проводятся во Всесоюзном НИИ электрификации сельского хозяйства, Всесоюзном НИИ электромеханики, ЦАГИ и др.), Германии (Штутгартская школа ветроэнергетиков), США, Великобритании, Франции, Дании и др. странах.

В СССР число эксплуатируемых ветродвигателей (без самодельных) составляло 8-9 тысяч.

Второе дыхание ветроэнергетики получила после нефтяного кризиса 1972-1973 годов, когда многие развитые страны озаботились своей зависимостью от импорта нефти из арабских стран.

1.3. Ветроэнергетика периода конца XX века – начала XXI века

Перспектива развития

Помимо указанной в предыдущем параграфе причины нового витка развития ветроэнергетики – проблемы с импортом нефти, мировое сообщество серьезным образом заинтересовала другая проблема – состояние экологии планеты и главным образом эмиссия углекислого газа. Ветроустановки идеальным образом вписываются в состав радикальных средств решения общих проблем, стоящих перед человечеством: энергетика и экология. Впрочем этой проблеме посвящен специальный раздел книги.

Остановимся на характеристиках указанного выше периода развития ветроэнергетики.

Внутри этого периода явственно можно выделить три этапа: I этап – 1981-1990 годы, II этап – 1991-2000 годы, III этап – 2001-2010 годы.

На первом этапе (табл. 1.3.1.) ветроэнергетика начинает развиваться в 15 странах. К концу этапа Америка являлась безусловным лидером по вводу мощности (1525 МВт), за ней следовали Дания (310 МВт) и Германия (60 МВт)

Таблица 1.3.1. Развитие ветроэнергетики мира в 1981-1990 годах.

	Страна	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
1.	Бельгия	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5
2.	Дания	3	10	15	25	50	75	100	139	254	310
3.	Германия	2	2	2	2	3	5	7	8	10	60
4.	Греция	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2
5.	Италия	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4

	Страна	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
6.	Нидерланды	-	-	-	-	-	7	16	22	33	49
7.	Испания	-	-	-	-	-	-	1	1	5	9
8.	Швеция	-	3	5	6	5	5	5	5	5	5
9.	Великобритания	-	-	-	-	-	-	3	3	6	6
10.	Канада	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3
11.	США	10	70	240	597	1039	1222	1356	1396	1403	1525
12.	Индия	-	-	-	-	-	4	4	6	11	20
13.	Япония	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
14.	Португалия	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
15.	Другие	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Всего	15	85	262	630	1097	1318	1494	1580	1738	2002

Источник: AWEA – Американская ветроэнергетическая ассоциация.

К середине 80-х годов относится серьезнейшая попытка возродить на новом техническом уровне ветроэнергетику Советского Союза, предпринятая Бюро Совета Министров СССР по топливно-энергетическому комплексу. Результатом сложнейшей аналитической, согласовательной и организационной работы ученых, сотрудников министерств, Комитетов и Бюро по ТЭК явилось Постановление Совета Министров СССР от 17 сентября 1987 года № 1052 “Об ускоренном развитии ветроэнергетической техники в 1089-1995 годах”.

Заинтересованный читатель может изучить это Постановление в Приложении 1.1.

На автора этих строк были возложены обязанности “выпускающего” Постановление и контроль за его выполнением. Как единственный свидетель “борьбы” за подписание Постановления свидетельствую о решающей роли в продвижении Постановления Председателя Бюро СМ СССР по ТЭК, заместителя Председателя Совета Министров СССР Бориса Евдокимовича Щербины. С его непосредственной помощью были преодолены основные трудности в согласовании документа на уровне Президиума Совмина СССР.

Сожалею, что не сохранил копию визового экземпляра Постановления. Читатель легко может представить количество необходимых виз, поскольку перед визой Министра или Председателя Комитета, необходимо было получить от 5 до 10 согласующих подписей. Всего в Постановлении задействовано 9 Министерств и Комитетов, АН СССР, 5 Союзных республик.

При полном или частичном использовании материалов ссылка
на сайт www.energystrategy.ru обязательна.

Институт энергетической стратегии (ГУ ИЭС)
109028, г. Москва, Яузский бульвар 13, стр. 3, офис 10
tel/fax: +7 (495) 698-52-34
www.energystrategy.ru; e-mail: guies@guies.ru

По вопросам выпуска и реализации электронных версий наших изданий
обращайтесь в информационный отдел:
tel/fax: +7 (495) 917-39-79; e-mail: inf.guies@live.ru
ICQ: 4951278; Skype: info.mrng