

ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ ВЕТРОТУРБИН

Лектор: Байжұма Жандос Ескендірұлы

Тел.: +7 707 556 60 08

Email: zhandos.baizhuma@kaznu.edu.kz

Лекция1

Тема. Энергия ветра и возможности ее использования. Происхождение ветра, ветровые зоны. Перспективы использования энергии ветра

Цель: Рассмотреть происхождение ветра как природного явления, изучить глобальные ветровые зоны Земли и проанализировать современные технологии, масштабы и перспективы использования энергии ветра в мировом энергетическом балансе.

Основные вопросы:

1. Происхождение и физическая природа ветра.
2. Глобальные ветровые зоны и закономерности их распределения.
3. Основные принципы преобразования энергии ветра в электрическую.
4. Современные ветроэнергетические технологии и типы установок.
5. География и лидеры мировой ветроэнергетики.
6. Экономические, экологические и технологические перспективы развития ветроэнергетики

Краткие тезисы:

- **Ветер** — это движение воздушных масс, вызванное неравномерным распределением температуры и давления в атмосфере. Основными факторами, определяющими направление и силу ветра, являются солнечное излучение, вращение Земли, рельеф местности и различия в нагреве суши и океанов.
- **Глобальные ветровые зоны:**
 - Пассаты (постоянные восточные ветры между 0° и 30° широты);
 - Западные ветры умеренных широт ($30-60^\circ$);
 - Полярные восточные ветры (выше 60°).
- Наиболее перспективные регионы для ветроэнергетики — прибрежные зоны, горные районы, степи и океанические побережья с постоянными ветрами.
- **Принцип работы** ветроэнергетических установок основан на преобразовании кинетической энергии ветра в механическую (вращение лопастей), а затем — в электрическую с помощью генератора.
- **Типы ветроустановок:**
 - С горизонтальной осью вращения (наиболее распространённые);
 - С вертикальной осью (для городских и автономных систем).
- **Лидеры мировой ветроэнергетики (2024 г.):**
 - **Китай** — более 440 ГВт установленной мощности (около 50% мировой ветроэнергетики);
 - **США** — около 150 ГВт;
 - **Германия, Индия, Испания, Великобритания** — крупнейшие европейские производители ветроэнергии;
 - Быстро растущие рынки: Бразилия, Вьетнам, Турция, Южная Корея.
- **Морская (оффшорная) ветроэнергетика** — ключевое направление развития. Лидеры: Великобритания, Китай, Нидерланды, Дания.
- **Преимущества ветроэнергии:** экологическая чистота, возобновляемость, снижение выбросов CO_2 , устойчивость к колебаниям цен на топливо.
- **Недостатки:** непостоянство выработки, потребность в накопителях энергии, шум, воздействие на пейзаж и экосистемы.
- **Перспективы:** развитие гибридных систем (ветер + солнце), внедрение водородных технологий, снижение себестоимости энергии благодаря инновациям в турбинах и цифровому управлению.

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом.

Различные зоны страны имеют ветровые режимы, сильно отличающиеся один от другого. Значение среднегодовой скорости ветра в данном районе дает все же возможность приблизительно судить о целесообразности использования ветродвигателя и об эффективности агрегата.

Прибрежные зоны северной части страны, Каспийское побережье и северная часть Сахалина, отличаются высокой интенсивностью ветрового режима. Здесь среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/с.

В этих районах часто наблюдаются ураганные ветры (выше 30 м/с), которые сопровождаются снежными метелями и буранами. Поэтому в указанной зоне можно использовать только агрегаты с ветродвигателями высокой быстроходности (двух-, трехлопастные), прочность которых рассчитана на ветровые нагрузки при скоростях ветра 40 м/с. В Арктике и на побережье наиболее эффективно применение ветроэлектрических станций, работающих совместно с тепловым резервом, а также небольших ветроэлектрических агрегатов.

Большинство областей европейской части России относятся к зоне средней интенсивности ветра. В этих районах среднегодовая скорость ветра составляет от 3,5 до 6 м/с. К этой же зоне относится часть территории, лежащая юго-восточнее озера Байкал.

Третья зона занимает обширную территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока, некоторых областей европейской части России. В этой зоне скорости ветра относительно невелики – до 3,5 м/с, и широкое применение здесь ветроэнергетических установок не рекомендуется.

Огромная энергия движущихся воздушных масс. Запасы энергии ветра более чем в сто раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. Климатические условия позволяют развивать ветроэнергетику на огромной территории от наших западных границ до берегов Енисея. Богаты энергией ветра северные районы страны вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Почему же столь обильный, доступный, да и экологически чистый источник энергии так слабо используется? В наши дни двигатели, использующие ветер, покрывают всего одну тысячную мировых потребностей в энергии. Техника 20 века открыла совершенно новые возможности для ветроэнергетики, задача которой стала основной – получение электроэнергии. В начале века Н.Е. Жуковский разработал теорию ветродвигателя, на основе которой могли быть созданы высокопроизводительные установки, способные получать энергию от самого слабого ветерка. Появилось множество проектов ветроагрегатов, несравненно более совершенных, чем старые ветряные мельницы. В новых проектах используются достижения многих отраслей знания. В наши дни к созданию конструкций ветроколеса привлекаются специалисты-самолетостроители, умеющие выбрать наиболее целесообразный профиль лопасти, исследовать его в аэродинамической трубе. Усилиями ученых и инженеров созданы самые разнообразные конструкции современных ветровых установок.

Первой лопастной машиной, использовавшей энергию ветра, был парус. Парус и ветродвигатель, кроме одного источника энергии, объединяет один и тот же используемый принцип. Исследования Ю.С. Крюкова показали, что парус можно представить в виде ветродвигателя с бесконечным диаметром колеса. Парус является наиболее совершенной лопастной машиной, с наивысшим коэффициентом полезного действия, которая непосредственно использует энергию ветра для движения.

Ветроэнергетика, использующая ветроколеса и ветрокарусели (двигатели карусельного типа см. рис. 2), возрождается сейчас, прежде всего, в наземных установках. В США уже построены и эксплуатируются коммерческие установки. Проекты наполовину финансируются из государственного бюджета. Вторую половину инвестируют будущие

потребители экологически чистой энергии.

Еще в 1714 году француз Дю Квит предложил использовать ветродвигатель в качестве движителя для перемещения по воде. Пятилопастное ветроколесо, установленное на треноге, должно было приводить в движение гребные колеса. Идея так и осталась на бумаге, хотя понятно, что ветер произвольного направления может двигать судно в любом направлении.



Рис. 2. Ветродвигатель карусельного типа

Еще в 1714 году француз Дю Квит предложил использовать ветродвигатель в качестве движителя для перемещения по воде. Пятилопастное ветроколесо, установленное на треноге, должно было приводить в движение гребные колеса. Идея так и осталась на бумаге, хотя понятно, что ветер произвольного направления может двигать судно в любом направлении.

Первые разработки теории ветродвигателя относятся к 1918 г. В. Залевский заинтересовался ветряками и авиацией одновременно. Он начал создавать полную теорию ветряной мельницы и вывел несколько теоретических положений, которым должна отвечать ветроустановка.

В начале XX века интерес к воздушным винтам и ветроколесам не был обособлен от общих тенденций времени – использовать ветер, где это только возможно. Первоначально наибольшее распространение ветроустановки получили в сельском хозяйстве. Воздушный винт использовали для привода судовых механизмов. На всемирно известном

«Фраме» («Фрам» [фр. *frum* вперед] – исследовательское судно Ф. Нансена, исследователя Арктики) он вращал динамомашину. На парусниках ветряки приводили в движение насосы и якорные механизмы.

В России к началу нынешнего века вращалось около 2500 тысяч ветряков общей мощностью миллион киловатт. После 1917 года мельницы остались без хозяев и постепенно разрушились. Правда, делались попытки использовать энергию ветра уже на научной и государственной основе. В 1931 году вблизи Ялты была построена крупнейшая по тем временам ветроэнергетическая установка мощностью 100 кВт, а позднее разработан проект агрегата на 5000 кВт. Но реализовать его не

удалось, так как Институт ветроэнергетики, занимавшийся этой проблемой, был закрыт.

Такова была общемировая тенденция. В США к 1940 году построили ветроагрегат мощностью в 1250 кВт. К концу войны одна из его лопастей получила повреждение. Ее даже не стали ремонтировать, посчитав, что выгодней использовать обычную дизельную электростанцию.

Неудавшиеся попытки использовать энергию ветра в крупномасштабной энергетике сороковых годов не были случайны. Нефть оставалась сравнительно дешевой, резко снизились удельные капитальные вложения на крупных тепловых электростанциях, освоение гидроэнергии, как тогда казалось, гарантирует и низкие цены, и удовлетворительную экологическую чистоту.

За последние 30 лет внимание мировой общественности к проблеме использования возобновляемых источников энергии резко возросло. Сильным толчком, возбудившим это внимание, был энергетический кризис 1973 года. Уже в 1974 году в ряде стран, в том числе и в США, были разработаны многолетние программы исследований, разработок и производства преобразователей солнечной, ветровой, геотермальной и других видов возобновляемых источников энергии. При этом значительная часть финансовых средств, необходимых для реализации указанных программ, выделялась за счет средств госбюджета. Причиной такой реакции на кризис явились доклады крупных ученых-энергетиков, представивших доказательства истощения в ближайшем будущем запасов нефти и реальной опасности для мирового сообщества наращивания во все возрастающих масштабах использования ископаемых видов топлива, уже приводящего к глобальному потеплению климата и к загрязнению планеты, одним из очевидных последствий которого стало часто повторяющееся во многих странах выпадение кислотных дождей.

По данным департамента окружающей среды Дании количество выбросов в атмосферу, приводящихся на 1 кВт·ч энергии, выработанной на тепловых электростанциях, работающих на различных видах органического топлива, составляет: двуокись серы – 5...8 г., окись азота – 3...6 г., углекислый газ – 750...1250 г., сажа и пепел – 50...70 г.

За прошедшие 25 лет интенсивного развития ветроэнергетики был достигнут огромный прогресс. Первые конструкции ВЭУ, освоенные в серийном производстве в США, Дании, Нидерландах, Германии и других странах, имели номинальную мощность от 30 до 100 кВт. Себестоимость вырабатываемой энергии на первом этапе эксплуатации ветровых ферм в штате Калифорния (США) была на уровне 30 цент/кВт·ч. В дальнейшем превысила уровень 10 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии.

при повышении номинальной мощности ВЭУ до 500...700 кВт в одном агрегате и совершенствовании методов управления и организации эксплуатации ветровых ферм себестоимость вырабатываемой энергии снизилась до 5 цент/кВт·ч, что обеспечивает рентабельность использования ВЭУ по сравнению с электростанциями, работающими на угле. В отдельных районах Дании и штата Калифорния для энергии, выработанной на ветровых фермах, уже

Высокие темпы развития ветроэнергетики характерны для Германии 1990-х годов. Особого внимания заслуживает опыт фирмы «Enercon», которая освоила гамму ВЭУ мощностью 30, 130, 600, 1500 кВт в одном агрегате, выполненных с трехлопастными стеклопластиковыми ветроколесами, имеющими диаметр от 12 до 66 м. Все агрегаты фирмы имеют безредукторное исполнение, которое стало возможным за счет использования многополюсных тихоходных генераторов кольцевого типа. Отсутствие редуктора позволило снизить уровень шума, упростить обслуживание, повысить надежность.

ВЭУ имеет ветроколесо диаметром 40 м, высоту башни – до 65 м, номинальную мощность – 600 кВт, которая развивается при скорости ветра 13 м/с. В 1999 году количество ВЭУ этого типа, находящихся в эксплуатации, превысило 2000 шт.

В настоящее время промышленным производством ВЭУ в мире занимается более 300 фирм. Наиболее развитую промышленность имеют Дания, США, Германия. Серийное производство ВЭУ большой и малой мощности организовано также в Нидерландах,

Великобритании, Италии, Испании и в ряде других стран. В производстве ВЭУ, предназначенных для заряда аккумуляторов, лидирует Китай.

Обращает на себя внимание более чем двукратный отрыв Германии от США, которые в последние годы резко сбавили темпы прироста мощностей.

Однако сейчас в США вновь планируется крупномасштабное строительство ВЭС, в том числе в штате Техас (500 МВт), Калифорнии (439 МВт), на стыке территорий штатов Орион и Вашингтон (300 МВт) и в штате Невада (260 МВт). На строительство выделяются средства из фонда развития возобновляемых источников энергии, образованного в 1997 году.

Лидером ветроэнергетики в Германии является в последние годы фирма «Energiekonzept». В 2000 году она выпустила 195 ВЭС типа E-66 мощностью 1,5...1,8 МВт, 26 ВЭС E-58 мегаваттового класса и 125 ВЭС E-40 мощностью 500...600 кВт. Кроме того, 192 ВЭС типа E-40 были проданы в Испанию и Италию.

Средняя мощность ВЭС, выпущенных в Германии в 2000 году, возросла до 1150 кВт. Тенденция роста единичной мощности, по-видимому, сохранится: германская фирма «De Wind», подготовив новую конструкцию ВЭС мощностью 2 МВт к производству, уже планирует создание ВЭС мощностью 3...5 МВт.

Утвердив план строительства ВЭС суммарной мощностью 400 МВт, Великобритания рассчитывает в 2010 году ввести в эксплуатацию ВЭС общей мощностью 6000 МВт, доведя вклад возобновляемых источников энергии в энергетику страны до 10 %. При этом 40 % ВЭС будет установлено в прибрежной зоне, на мелководье.

Дания и Швеция также рассчитывают расширить свой парк ВЭС за счет их сооружения в прибрежной зоне. Нидерландская фирма «Enron Wind» уже установила в Швеции семь ВЭС мегаваттного класса на мелководье. Та же фирма за полгода после начала строительства ввела в эксплуатацию ветровую ферму в Германии мощностью 31,5 МВт на базе ВЭС «Enron» 1,5 (мощностью 1,5 МВт, диаметр ветроколеса 70,5 м, высота мачты 85 м).

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. В чем заключается перспективность ветроэнергетики?
2. Какие льготы введены для объектов ветроэнергетики?
3. Что такое потенциал энергии ветра?
4. Чем различаются ветроустановки с горизонтальной и вертикальной осью?
5. Назовите основные страны — лидеры по объёму ветроэнергетики.
6. В чём заключаются преимущества и недостатки использования энергии ветра?
7. Каковы перспективные направления развития ветроэнергетики в мире?

Рекомендуемая литература:

1. Global Wind Energy Council (GWEC). Global Wind Report 2024. — <https://gwec.net>
2. World Wind Energy Association (WWEA). World Wind Energy Report 2023. — <https://wwindea.org>
3. Boyle, G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. — Oxford University Press, 2020.
4. Hau, E. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. — Springer, 2022.
5. Twidell, J., Weir, T. Renewable Energy Resources. — Routledge, 2021.
6. Международное энергетическое агентство (IEA). Renewables 2024: Analysis and Forecasts to 2028.