

ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ ВЕТРОТУРБИН

Лектор: Байжұма Жандос Ескендірұлы

Тел.: +7 707 556 60 08

Email: zhandos.baizhuma@kaznu.edu.kz

Лекция 8

Тема. Энергетический кадастр ветра (ресурс). Изменение скорости ветра в зависимости от высоты. Математические функции распределения скорости ветра. Методика исследования и оценка ветровой энергии.

Цель: Познакомиться с методами оценки ветрового ресурса, понять распределение скорости ветра по высоте и освоить математические подходы к расчету энергии ветра.

Основные вопросы:

1. Понятие энергетического кадастра ветра и его назначение.
2. Изменение скорости ветра с высотой.
3. Математические функции распределения скорости ветра.
4. Методика исследования ветрового ресурса.
5. Оценка потенциальной энергии ветра для целей генерации.

Краткие тезисы:

- **Энергетический кадастр ветра** — систематизированные данные о скорости и направлении ветра, используемые для планирования ветроэнергетических объектов.
- **Изменение скорости ветра с высотой:**
 - На поверхности скорость ветра меньше из-за трения о землю.
 - Закон увеличения скорости с высотой описывается **логарифмической** или **степенной функцией**:
- **Функции распределения скорости ветра:**
 - Используются для статистической оценки ресурса ветра.
 - Чаще всего применяются **распределения Вейбулла и Гаусса**.
- **Методика исследования ветра:**
 - Метеостанции и анемометры на разных высотах.
 - Длительные наблюдения (год и более) для учета сезонности.
 - Обработка данных для определения среднего и максимального ветра.

Энергетический кадастр ветра представляет собой систематизированную информацию о ветровых ресурсах определённой территории, которая используется для оценки потенциала ветроэнергетики. Создание такого кадастра является важнейшим этапом в планировании и проектировании ветроэнергетических установок, поскольку позволяет определить оптимальные места для их размещения и прогнозировать выработку энергии. Кадастр включает данные о средней скорости ветра, её изменчивости, направлениях и частоте различных ветровых режимов.

Измерение ветрового потенциала проводится с помощью анемометров, установленных на разных высотах, а также с помощью спутниковых данных и моделирования атмосферы. Одной из ключевых особенностей ветрового ресурса является изменение скорости ветра с высотой над землёй. Обычно скорость ветра увеличивается с высотой, что связано с уменьшением турбулентности и сопротивления, оказываемого поверхностью. Для описания этого процесса применяются различные математические модели, позволяющие экстраполировать данные измерений с одной высоты на другую.

Одной из наиболее распространённых моделей является степенной профиль ветра, который описывает зависимость скорости ветра $v(h)$ на высоте h следующим уравнением:

$$v(h) = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

где v_{ref} — скорость ветра на опорной высоте h_{ref} , а α — показатель шероховатости, зависящий от характеристик местности (например, городская застройка, лес, равнина).

Для точного описания распределения скоростей ветра в пределах района применяются статистические функции распределения. Наиболее часто используется распределение Вейбулла, которое хорошо подходит для моделирования вероятностей различных значений скорости ветра. Функция плотности вероятности для распределения Вейбулла задаётся формулой:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}$$

где v — скорость ветра, k — параметр формы, а c — масштабный параметр, характеризующий среднюю скорость ветра.

Использование таких моделей позволяет прогнозировать распределение ветрового потока и оценивать ожидаемую производительность ветроэнергетических установок. Это особенно важно при проектировании турбин, так как их технические характеристики оптимизируются под определённый диапазон скоростей ветра.

В условиях Казахстана, где рельеф и климатические особенности существенно влияют на характеристики ветра, создание точного энергетического кадастра является необходимым для успешного развития ветроэнергетики. Исследования показывают, что в некоторых регионах страны среднегодовые скорости ветра на высоте типичной установки (50–100 метров) достигают 6–8 м/с, что является хорошим показателем для эффективной генерации электроэнергии.

Таким образом, энергетический кадастр ветра и математические методы анализа ветровых данных играют ключевую роль в развитии ветроэнергетики. Они обеспечивают основу для обоснованного выбора площадок, расчёта мощности ветроустановок и повышения экономической эффективности проектов. Внедрение современных методов измерения и обработки данных позволит максимально использовать природный потенциал ветра и способствовать развитию возобновляемой энергетики в Казахстане и других регионах с подобными условиями.

Методика исследования и оценка ветровой энергии.

Лаборатория Sandia и фирмы GE и Lockheed используют для оценки ветроэнергетических ресурсов одни и те же частотные характеристики распределения скорости ветра, полученные фирмой Lockheed. Оценки фирм GE и Lockheed были выборочными и проводились по данным специально отобранных станций. Фирма Lockheed исключала станции с так называемыми «ограниченными данными», т. е. с тремя классами скоростей ветра или с числом суммарных наблюдений в месяц меньше 4000. В процессе отбора учитывались станции с минимальным периодом наблюдений в шесть лет. В то же время данные по многим станциям с «ограниченными данными», которые расположены в зонах со сравнительно большой энергией ветра, были включены в карту среднегодовой плотности энергии. Фирма GE использовала некоторые станции с числом классов скоростей ветра менее пяти, а над континентальной частью США упор был сделан на использование, в первую очередь станций NWS. Таким образом, фирма GE использовала значительно меньше станций, чем фирма Lockheed, но ее оценки основываются главным образом на данных радиозондов. В дополнительные сводные и имеющиеся данные по ветру, которые не использованы при оценке ветровых ресурсов, включаются обработанные данные ежечасных (или трехчасовых) измерений ветра. Метод оценки энергии ветра на ограниченной территории (площади), использованный лабораторией Sandia и фирмой GE, основан на том, что расчет энергии ветра ведут по частотным распределениям скорости ветра, используя среднюю скорость для каждого класса. Фирма GE установила, что значение энергии ветра, рассчитанное по средней скорости в каждом классе, больше (от 3,2 до 10,5 % для семи оцениваемых станций) ее значения, подсчитанного по индивидуальным ежечасным измерениям скорости ветра. На всех этих станциях использовались одиннадцать классов скорости ветра. Однако в [2.1] указывается, что использование среднего класса скорости ветра для данного класса дает в большинстве случаев не более чем удвоенную ошибку. Исследования фирмы Lockheed показали, что при уменьшении числа классов скорости ветра процентная ошибка определяемой энергии увеличивается. Из общего числа станций, изученных лабораторией Sandia, 128 имели только три класса скорости ветра и 263 — шесть и менее классов. Энергия ветра, оцениваемая по этим сводным данным, обычно на 10—30 % выше, чем рассчитанная по фактическим данным ежечасных измерений. Фирма Lockheed не использовала при расчете энергии ветра средние скорости ветра по классам. Вместо этого собирались данные по повторяемости скоростей ветра, сгруппированные по классам. Эти интегральные распределения представлялись плавно изменяющимися кривыми (сплайнами) и оценивались в каждом десятичном интервале. Энергия ветра определялась пропорционально кубу скорости. При этом разница в энергии ветра, оцениваемой на основе этой методики, и по средним значениям по классам обычно меньше 5 %. Изменение высоты расположения анемометра. Только фирма Lockheed дает обзор данных по высоте расположения анемометра на всех использованных станциях. Скорость ветра, измеренная на высоте расположения анемометра, приводилась к высоте 10 м, а затем от этого уровня осуществлялся переход на высоты до 50 или 100 м. При этом использовалась формула степенного закона изменения профиля скорости ветра по высоте. В то же время указывается, что для станций, у которых высота расположения анемометра неизвестна или изменяется за рассматриваемый период, исходная высота принималась равной 10 м. До 1960 г. типовая высота расположения анемометра была большей частью от 10 до 40 м от поверхности, так как часто он устанавливался на зданиях и в аэропортах. При

использовании степенного закона изменения скорости ветра по высоте с показателем, равным 0,2, значение энергии ветра на высоте 20 м на 52 % превышает энергию на высоте 10 м. Таким образом, принимая высоту расположения анемометра равной 10 м для тех станций, на которых она изменяется за период наблюдений или же вообще неизвестна, можно получить завышенные значения энергии ветра на разных высотах от поверхности земли. Однако если даже фактическая высота анемометра приведена к 10 м, то неопределенность и ошибки в оценках могут возникать вследствие разной периодичности измерений и влияния на поток ветра зданий. В условиях когда высота и период измерений анемометра переменны и неопределенны, трудно получить представительную оценку скорости ветра и, следовательно, его энергии. Это объясняется в значительной степени вариациями в оценках ветра на различных станциях. В одном из вариантов рассмотрены только те данные по скоростям ветра за 1960 и 1970 гг., когда высота расположения анемометра была постоянной и периодичность измерений достаточно хорошо выдерживалась. В конце 1950 и в начале 1960 годов на большинстве аэропортов анемометры были установлены на высоте 6 м от поверхности земли и вдали от зданий. Эти данные обрабатывались за трехчасовые интервалы и находились в распоряжении центра НСС. Поэтому использование этих данных в качестве источника информации значительно снижало ошибки, связанные с неопределенностью высоты установки анемометра и периода измерений. Изменение плотности атмосферы в зависимости от расположения станции учитывалось в исследованиях фирмы Lockheed, но не принималось в расчет в оценках фирмы GE и лаборатории Sandia. Пренебрежение изменением плотности приводит к завышению энергии ветра более чем на 9 % на каждый 1 км подъема местности над уровнем моря. Использование значения плотности на уровне моря в оценках фирмы GE и лаборатории Sandia привело к тому, что энергия ветра, оцениваемая на станциях, была на 5—20 % выше, чем над Великими равнинами и в бухтах на западе. Использование данных радиозонда на высоте 150 м осуществлялось фирмой GE как для оценки энергии ветра на этой высоте, так и для экстраполяции ее на высоту 50 м. Этот анализ среднегодовых данных на высоте 50 м основан только на измерениях радиозонда 00Z. Однако фирма GE анализирует также месячные значения на 20 станциях радиозондами 00Z и 12Z и указывает, что показанная модель распределения энергии и относительное значение максимума и минимума действительно характерны при анализе только радиозондом 00Z. При сравнении скорости ветра для радиозондов 00Z и 12Z установлено, что учет в анализе ветра радиозонда 12Z приводит к увеличению оцениваемой энергии ветра над южной частью Великих равнин и к некоторому ее уменьшению над большей частью остальной территории США. Таким образом, анализ показывает, что относительное значение изменяется, но крупномасштабная структура энергии ветра для радиозондов 00Z и 12Z остается (подобной при отчетливом максимуме, который наблюдается над Великими равнинами, на восток от Скалистых гор, вдоль северо-восточного и южного побережья Техаса. Однако благодаря большому расстоянию между станциями только суммарные характеристики могут быть оценены на основе этих данных. Методика экстраполяции скорости по высоте (вертикальный профиль ветра) очень важна для оценки энергии ветра. В [2.9] предлагается использовать показатель степени $1/7$; фирма Lockheed экстраполирует скорость ветра на высоте 10 м от поверхности до 50 м, используя показатель 0,2. Оценка энергии ветра U на высоте 50 м, основанная на показателе 0,2, дает значения, в большие, чем при показателе $1/7$, на 32 %. Таким образом, этот фактор также будет причиной расхождений при оценке энергии ветра. Однако нельзя обосновать использование какого-либо одного показателя степени в сравнении с другим при оценке ресурса ветра. Фирма GE, экстраполируя на меньшую высоту результаты оценки, полученные по данным радиозонда на высоте от 150 до 2850 м, указывает, что не хватало более последовательной и надежной системы значений, получаемых путем сравнения экстраполяции энергии ветра от поверхности, где высота расположения анемометра может меняться очень существенно. Фирма GE вначале использовала закон с показателем $1/7$, что равносильно закону с

показателем $3/7$ для энергии ветра и для экстраполяции скорости на меньшие высоты. Однако некоторые из значений для высоты 50 м были меньше значений энергии ветра у поверхности, рассчитанной по данным, использованным лабораторией Sandia. Была применена эмпирическая методика, в которой используемое соотношение энергии ветра на высотах от 50 до 150 м есть функция отношения энергии ветра на 150 м и у поверхности. Однако было установлено, что оценка энергии ветра на высоте 50 м, основанная на этой методике, на 30—60 % меньше или больше для районов озера Гранд-Лейк, среднего запада и Великой равнины, чем средняя оценка, основанная на экстраполяции от 10 м (см. табл. 2.1). Одно из объяснений состоит в том, что измерения радиозондом, производимые два раза в день (утром и вечером), не соответствуют должным образом суточным вариациям скорости ветра. Ветер у поверхности в характерных условиях более сильный после полудня. Для оценки наибольшей энергии ветра у подножия гор по всем трем способам используются статистические данные, относящиеся к ветровым характеристикам Northern Hemisphere, приведенные в [2.10]. Фирма GE допускает, что энергия у горных вершин примерно равна энергии свободного ветрового потока на высоте вершины. Фирма Lockheed считает, что скорость ветра у горных вершин составляет половину скорости свободного потока (V_s часть его энергии). На основании исследований [2.18] эти значения принимались для высоты 10 м и экстраполировались на высоту 50 м с использованием показателя степенного закона 0,2. Таким образом, значения фирмы Lockheed для горных вершин на высоте 50 м составляют приблизительно $1/3$ значения энергии свободного ветрового потока. Так как зависимости энергии ветра у вершин гор и свободного ветрового потока на высоте вершины оказываются непостоянными, то нет уверенности в том, что одно из допущений дает более Доказательные оценки, чем другое. Наблюдаемые Уг у различных вершин на территории США показывают, что вблизи некоторых вершин или гребней гор энергия ветра больше, чем в свободном ветробой потоке. Например, на юге центральной части штата Вашингтон энергия оценивается в 1000 Вт/м², в Сандберге (южное Калифорнийское побережье) — 500 Вт/м² и горной части штата Вашингтон (Нью-Гемпшир) — 2000 Вт/м². Однако данные по ветру Для некоторых других вершин гор показывают значительно меньшие значения энергии ветра, чем это предполагалось. В качестве методики оценки энергии ветра в прибрежных водах фирма GE использовала распределение энергии ветра в квадранте Марседена по данным, полученным по наблюдениям на судах. Хотя Для них достоверно известны высота и точность измерения приборами на судах, эти данные ценны для определения моделей энер-1 гии ветра над зонами прибрежных вод. Лаборатория Sandia и! фирма Lockheed вначале базировались при оценке ветра в зоне* побережий и прибрежных зон на данных прибрежных станций, - часть которых расположена на островах в прибрежных водах. Сопоставление результатов анализа в прибрежных районах указывает на некоторые расхождения, например, по ветровым данным, полученным на судах: энергия ветра больше вдоль центрального залива побережья (в штате Луизиана, вплоть до северо-запада штата Флорида), чем вдоль побережья штата Техас, тогда как данные на прибрежных станциях показывают обратное. Однако на этих площадях с расхождениями данных трудно определить, какая из оценок более достоверна. Если средние данные измерений на борту судна получены на высоте больше 10 м, то они будут значительно завышенными.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается порядок проведения замера ветровой энергии в лаборатория Sandia?
2. Что дает полученные характеристики ветра для перспективу развития ВЭС?

Литература

Зубащенко Е.М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебнометодическое пособие. Часть 1. / Е.М. Зубащенко, В.И. Шмыков, А.Я. Немыкин, Н.В. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 183

