

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра метеорологии и климатологии

Ветроэнергетические ресурсы Саратовской области на разных высотах

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 5 курса 521 группы

направления 05.03.05 Прикладная гидрометеорология

Географического факультета

Агафонова Михаила Константиновича

Научный руководитель
профессор., д.г.н., доцент

А.Б. Рыхлов

Заведующий кафедрой
к.г.н., доцент

М.Ю. Червяков

Саратов 2021 год

Введение. В данной работе рассматривается общее состояние современной мировой ветроэнергетики и перспективы, общий математический аппарат задач ветроэнергетики и его применение в случае Саратовской области.

Основной задачей выступает исследование потенциала Саратовской области к возможному размещению на ее территории ветроэнергетических установок и ветроэлектростанций различной мощности. Для этого рассматриваются основные методы расчета энергетического потенциала ветровых потоков для данной территории на разных высотах. Расчеты основываются на обобщённых сводах многолетних наблюдений и фиксации первичной метеорологической информации – кадастрах климатологических данных.

Первая глава включает в себя очерк современного уровня развития отрасли по кратким статистическим показателям, как в России, так и в мире. Во второй главе рассматриваются основные физические формулы, необходимые для расчета ветроэнергетического потенциала. В третьей и четвертой главах рассматриваются скоростной и географический режимы ветра над территорией Саратовской области, исходные данные ветроэнергетического кадастра, которыми выступают климатологические справочники и атласы ветров, а также сами примеры первичных расчетов характеристик ветроэнергетического потенциала.

В работе приводятся оригинальные авторские расчеты удельной ветровой мощности для разных уровней высот, которые являются стандартными для установки ветроколес ВЭУ различной мощности. Подобные вычисления могут применены для дальнейшего исследования всех теоретических характеристик ветра, участвующие в формировании условий и задач ветроэнергетики.

Основная часть. Математическая оценка различных исследований показывает, что рост суммарной установленной мощности ВЭУ и ВЭС в мире за последние 20 лет принял экспоненциальный характер. Эта зависимость доказывает, что общее удвоение мощностей в индустрии происходит всего в течении трех лет. Влияние экологического фактора в экономике и социальной безопасности также, как и стремление стран с ограниченной территорией и природными ресурсами обеспечить устойчивое экономическое развитие постепенно расширяет сферу и рынок применения новых ВЭУ. Суммарная выработка энергии различными ветроустановками и станциями достигла 733,3 ГВт, что превысило на 82,5 ГВт выработку 2019 года. В общей доле выработки мировой электроэнергии отрасль достигла 6,15 %, что на 2,5 % процента выше по сравнению с 2015 годом.

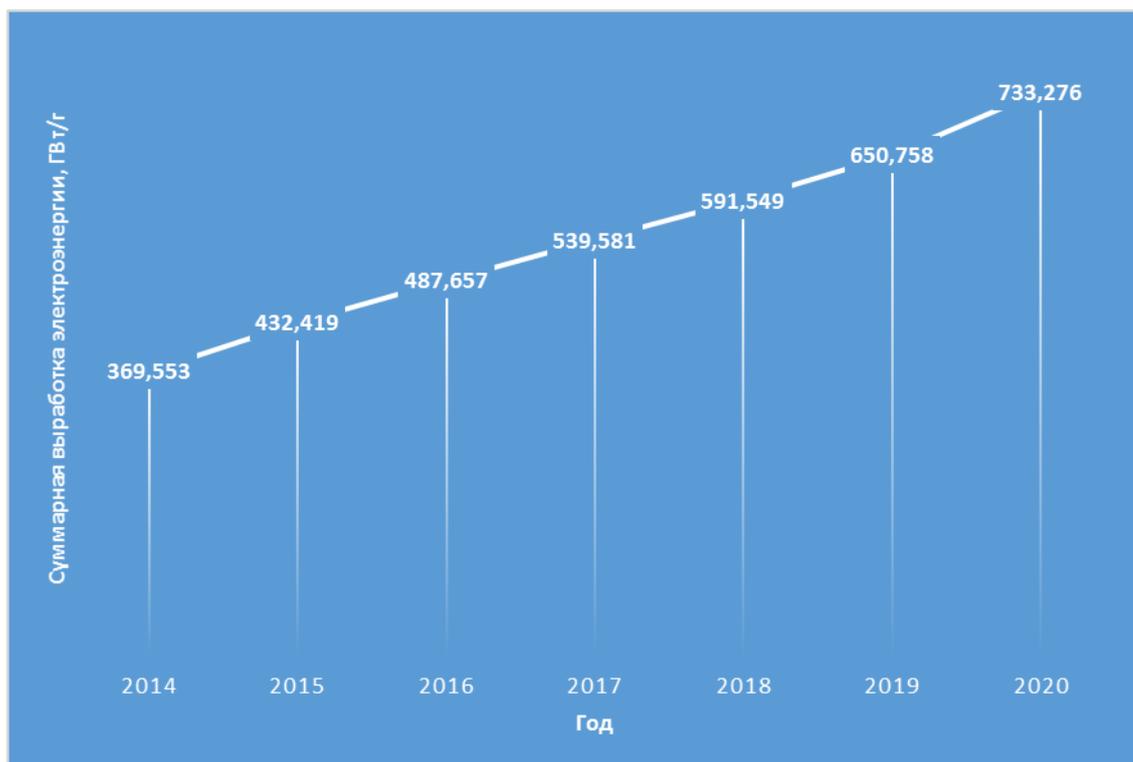


График роста мировой выработки ветровой энергии с 2014 по 2020 гг.
(составлено автором – по данным доклада агентства IRENA, 2021)

Россия занимает 37 место по выработке ветровой энергии при довольно низких темпах роста доли ветровой энергетики в общей выработке. По данным Российской Ассоциации Ветроиндустрии (РАВИ) на конец 2020 года в России вырабатывалось разными источниками в общей сложности 245,31 ГВт, из которых лишь 0,42% создаётся ВЭУ и ВЭС. Несмотря на экономические трудности, члены ассоциации планируют достичь к 2024 году объемов в выработке энергии 3415,7 МВт.

Анализ показателей и перспектив развития мировой ветроэнергетики последних 20 лет на основании официальных данных от Европейской ассоциации ветроэнергетики (EWEA) и Мировой ассоциации ветроэнергетики (WWEA) скорость роста потребления ветровой энергии будет увеличиваться и дальше. WWEA прогнозирует рост установленной мощности ВЭС в мире к 2030 г. до 2126 ГВт, что примерно в 1,5 раза превышает прогноз EWEA от 2019 года, в котором были сформулированы основные положения и ориентиры Программы ЕС развития ветроэнергетики до 2030 г. и ее перспективного развития до 2040 г. В соответствии с ним в 2030 г. вклад мировой ветроэнергетики в суммарную выработку электроэнергии должен составить 22%.

В отчете отмечается, что на Китай придётся 36% мирового прироста в течение следующего десятилетия, и к 2030 году мощность его ветроэнергетики достигнет 780 ГВт. Также по прогнозу самым быстрорастущим сегментом будет офшорная, или прибрежная, ветроэнергетика, которая вырастет с нынешних 35 до 248 ГВт установленной мощности в 2030-м.

Для основных расчетов в задачах ветроэнергетики используются следующие формулы.

$$N = \frac{1}{2} \rho v^3.$$

Это формула удельной мощности ветрового потока через единицу площади поперечного сечения (на которое воздействует вектор потока) за единицу

времени. Из нее следует, что удельная мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра и в силу этого способна значительно возрастать даже при небольшом усилении ветра. Из этого же следует, что для оценки мощности ветроустановок и количества вырабатываемой ими энергии необходима надежная информация о повторяемости различных скоростей ветра в предполагаемом районе их установки на уровне оси ветроколеса.

При анализе вертикальной составляющей воздушного потока наиболее важной характеристикой является вертикальный профиль распределения скоростей ветра, иными словами, изменение ветра с высотой на протяжении всего приземного слоя.

Важной особенностью при построении графиков распределения характеристик ветра является учет влияния земной поверхности на их изменение. С высотой сила трения, возникающая при движении воздушных масс, постепенно уменьшается, в связи с чем скорость ветра обычно возрастает, а порывистость и динамика ускорения воздушного потока уменьшается. Из данных эмпирических наблюдений следует, что градиент скоростей летом как правило меньше, чем зимой. Это объясняется влиянием температуры воздуха и его плотности, а конкретно сглаживанием вертикального перепада температуры. Исходя из модели адиабатического распределения температуры с высотой, на нижних уровнях приземного слоя атмосферы профиль ветра аппроксимируется зависимостью:

$$\bar{v}_z = \bar{v}_h \left(\frac{z}{h}\right)^m,$$

где \bar{v}_z – средняя скорость ветра на произвольной высоте; \bar{v}_h – средняя скорость ветра на начальном уровне h , высота которого как правило равна высоте флюгера на метеостанции – 10 м; z – высота произвольного уровня, на котором требуется найти скорость ветра; m – безразмерный параметр, являющийся эмпирической характеристикой среднегодового состояния атмосферы. Эта формула является степенной функцией, позволяющей успешно исследовать распределение средней скорости ветра по высотам, а

также находить потенциальную среднюю скорость ветра на фиксированном уровне приземного слоя по фактическим данным. Однако для полноты исследования распределения средней скорости ветра с высотой применяется логарифмическая функция, которая позволяет составить вертикальный профиль с большей репрезентативностью:

$$\bar{v}_z = \bar{v}_h \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln h - \ln z_0}, \quad (17)$$

где z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Задача восстановления режима ветра в любой точке приземного возникает каждый раз, как только появляется потребность в более точной информации относительно характера распределения ветра в мало исследуемой территории.

Наиболее эффективным способом решения этой задачи в настоящее время признан статистический метод. Его реализация может осуществляться по-разному, в зависимости от наличия той или иной исходной информации.

После ее реперной привязки к опорной станции, используя параметры распределения и закономерности изменения средней скорости, нетрудно восстановить вертикальный профиль ветра, используя статистические зависимости и один из законов изменения скорости с высотой. Очевидно, решить эту задачу гораздо проще, если использовать установленный закон распределения скоростей ветра, что позволит рассчитать любые статистические характеристики ветра.

В многочисленных исследованиях предлагались различные типы функций распределения скорости. Их можно отнести к двум наиболее распространённым видам: табулированные (Поморцева, Гринцевича, Гуллена) и аналитические (Гриневича, Вейбулла, Релея). Однако было выявлено, что из простых аналитических распределений скорости ветра наиболее точные результаты в диапазоне 4-20 м/с получается при использовании двухпараметрического распределения Вейбулла, или

Вейбулла-Гудрича, поскольку оно в наибольшей степени отвечает статистическим критериям согласия Колмогорова и Пирсона:

$$F(v) = \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^\gamma \right], \quad (17)$$

или:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} * \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma-1} * \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^\gamma \right], \quad (18)$$

где параметр β , имеющий размерность скорости, характеризует масштаб изменения функции распределения по оси скоростей, а параметр γ характеризует крутизну его распределения.

Для расчетов по данным формулам, необходимы исходные данные ветроэнергетических кадастров. В данной работе основным выступает Научно-прикладной справочник по климату СССР.

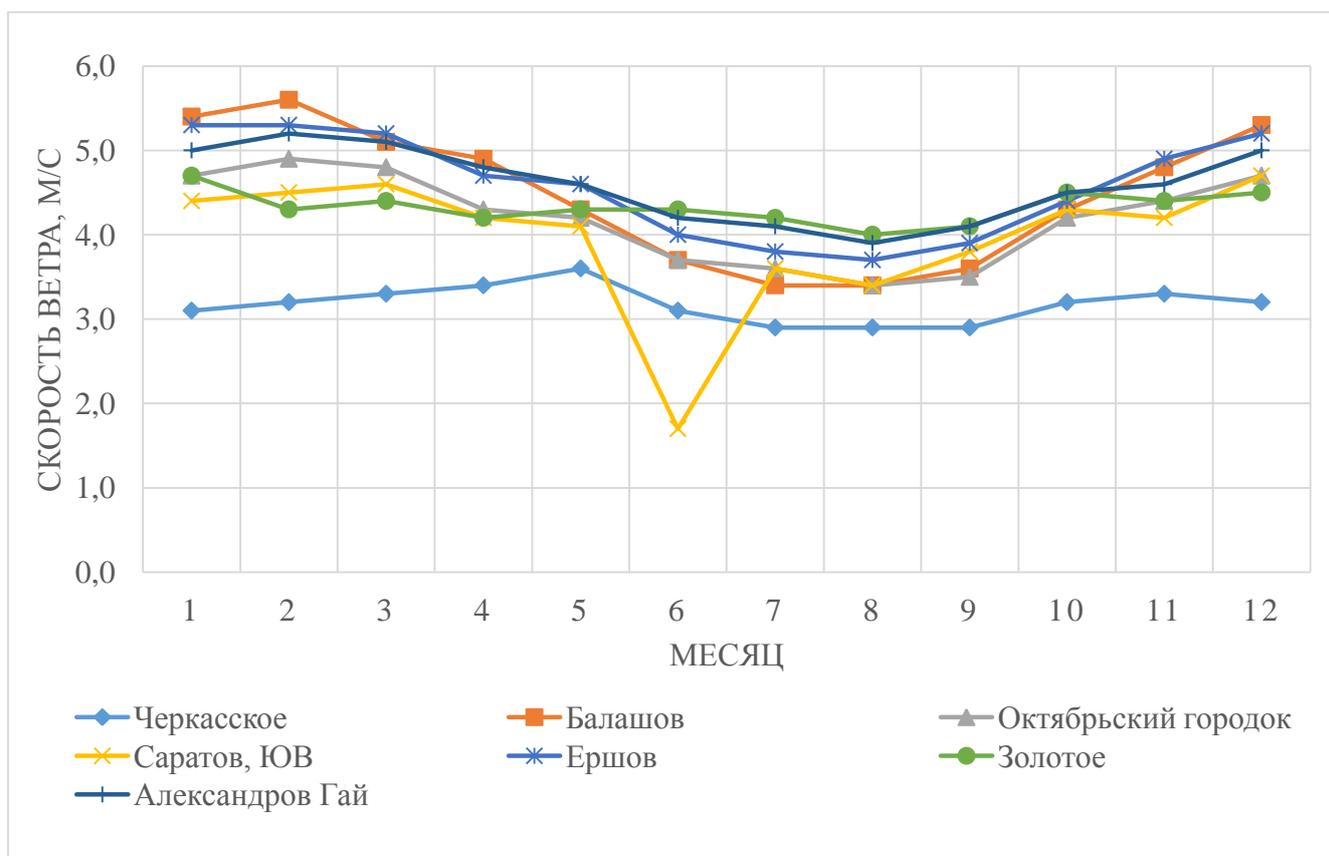


График средней скорости ветра на высоте Флюгера, м/с (составлено автором)

Из характерных особенностей ветрового режима Саратова можно выделить колебания градаций ветра по сезонам. В зимнее время в области наблюдаются наибольшие средние скорости ветра. Они колеблются в пределах 3,1 - 5,6 м/с экстремальных значений. В это время также наблюдаются наибольшие колебания средней скорости по области, что является следствием цикличности прохождения синоптических образований в атмосфере над областью. В весеннее время имеет понижение скоростей – 3,3 - 5,2 м/с. В летний период наблюдаются наиболее низкие значения – 2,9 - 4,3 м/с, что также объясняется цикличностью региональной циркуляции атмосферы. В осенний период средние скорости медленно начинают возрастать. Низкие темпы роста не позволяют превысить значения выше 5 м/с.

Поэтому, прежде чем перейти к расчету удельной мощности потока стандартных уровней, используемых в работе, необходимо по данным формулы выше восстановить потенциальное распределение скоростей ветра по высоте. Пример:

Приведенные значения средней скорости на уровне 100 м (составлено автором)

Приведенная скорость ветра для уровня 100 м													
Станция	Месяц/Год												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Черкасское	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	6,3	6,2	6,2	6,6	6,8	6,8	6,8	6,7
Балашов	8,1	8,2	7,9	7,8	7,5	6,6	6,4	6,4	7,0	7,5	7,8	8,0	7,4
Октябрьский городок	7,7	7,8	7,8	7,5	7,4	6,6	6,5	6,4	7,0	7,4	7,5	7,7	7,2
Саратов, ЮВ	7,5	7,6	7,6	7,4	7,3	5,4	6,5	6,4	7,2	7,5	7,4	7,7	7,2
Ершов	8,0	8,0	8,0	7,7	7,6	6,7	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	8,0	7,4
Золотое	7,7	7,5	7,5	7,4	7,5	6,9	6,8	6,7	7,3	7,6	7,5	7,6	7,3
Александров Гай	7,9	8,0	7,9	7,8	7,6	6,8	6,8	6,7	7,3	7,6	7,6	7,9	7,4

Используя подобные примеры расчетов, а также упомянутых ранее формул и их обобщения для конкретных регионов потенциальных областей

размещения ВЭУ, возможно начать расчет потенциальных ветроэнергетических характеристик для различных высот:

Значения удельной мощности ветрового потока для уровня 100 м

Удельная мощность на уровне 100 м													
Станция	Месяц/Год												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Черкасское	587,6	606,3	624,9	643,4	680,2	487,1	465,2	465,2	549,7	606,3	624,9	606,3	584,4
Балашов	1035,2	1080,6	970,1	928,4	810,3	553,6	519,9	519,9	680,2	810,3	908,1	1013,1	779,9
Октябрьский городок	888,0	928,4	908,1	810,3	791,3	553,6	542,2	519,9	661,8	791,3	829,4	888,0	732,4
Саратов, ЮВ	829,4	848,7	868,2	791,3	772,6	308,2	542,2	519,9	717,0	810,3	791,3	888,0	717,1
Ершов	1013,1	1013,1	991,4	888,0	868,2	589,1	565,2	553,6	735,4	829,4	928,4	991,4	796,3
Золотое	888,0	810,3	829,4	791,3	810,3	626,9	614,0	589,1	772,6	848,7	829,4	848,7	748,0
Александров Гай	949,1	991,4	970,1	908,1	868,2	614,0	601,4	577,0	772,6	848,7	868,2	949,1	796,3

Заключение. Получаемые в ходе подобных расчетов и анализа характеристики ветрового режима не только Саратовской области, но и любого другого региона, могут послужить первичной основой для дальнейших расчетов, необходимых для полноценного анализа перспектив размещения и работы ветроэнергетических установок в них.

Исходные данные по климатологии региона, а также конечные результаты подсчетов удельной мощности на высотах можно успешно применять для расчета многих теоретических и прикладных характеристик, как например коэффициент использования установленной мощности, валовый теоретический и технические потенциалы.

Помимо этого, становится возможным анализ экономической целесообразности размещения любых ВЭУ и ВЭС на данной территории.

Список источников

- 1 Безруких, П.П., Безруких, П.П. (мл.), Грибков, С.В. Ветроэнергетика: Справочнометодическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. — М.: Изд-во «ИнтехэнергоИздат», «Теплоэнергетик», 2014. — 304 с.
- 2 Шефтер Я. И. Использование энергии ветра - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983. — 200 с., ил.
- 3 Твайделл, Дж., Уэйр, А., Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ.— М.: Изд-во Энергоатомиздат. 1990.—392 с.: ил.
- 4 Анапольская, Л.Е., Режим скоростей ветра на территории СССР, Л., Изд-во Гидрометеоиздат, 1961. 199 с.
- 5 Атлас ветров России. А.Н.Старков, Л.Линдберг, П.П.Безруких, М.М.Борисенко, М., Изд-во Можайск-Терра, 2000, 560с.
- 6 Рыхлов, А.Б. Разработка методов климатологической оценки ветроэнергетического потенциала на различных высотах (на примере юго-востока европейской части России). Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2012. -200 с.
- 7 Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. Ветроэлектрические станции. Москва-Ленинград,: Изд-во Государственное энергетическое издательство, 1960. — 320 с.
- 8 Ветроэнергетика/Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ.; под ред. Я. И. Шефтера, М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1982. — 272 с., ил.
- 9 Фатеев Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки. М: Изд-во Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948. — 544 с.
- 10 Научно-прокладной справочник по климату СССР, Серия 3, Выпуск 12. Ветер. Л.: Изд-во Гидрометеоиздат, 1988-1993 гг. — с. 245 – 298
- 11 Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики / под ред. проф. Н. В. Кобышевой. СПб., 2008. — 336 с

- 12 Заварина М.В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. – Л.: Изд-во Гидрометеоиздат, 1971. – 162 с.
- 13 Заварина М.В., Цверава В.Г. О вертикальном распределении сильных ветров в пограничном слое атмосферы // Труды ГГО, 1966. Вып. 200, - 312 с.
- 14 Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. — Л.: Изд-во Гидрометеорологическое издательство, 1970. — 342 с.
- 15 Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. — Л.: Изд-во Гидрометеорологическое издательство, 1970. – 292 с.
- 16 Официальный сайт Российской Ассоциации Ветроиндустрии. [Электронный ресурс]: [Сайт] – URL: <https://rawi.ru> (дата обращения 17.11.2020) – Загл. с экрана. – Яз. рус.