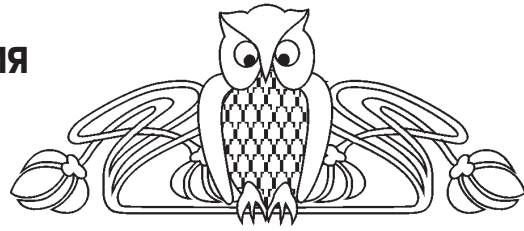




УДК 551.55

КЛИМАТО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

А. Б. Рыхлов

Саратовский государственный университет
E-mail: kafmeteo@sgu.ru

Разработаны теоретические основы универсальной климато-информационной технологии решения задач по оценке потенциальных и утилизируемых ветроэнергетических ресурсов и условий эксплуатации ВЭУ. Приемлемая погрешность пространственного восстановления ветроэнергетических характеристик, широкий круг возможностей, простота использования и другие достоинства этой технологии являются убедительным основанием для применения ее на стадии предпроектных разработок.

Ключевые слова: режим ветра, распределение скоростей ветра, ветровые ресурсы, климат, изменение с высотой, продолжительность работы, простой.

Climatic-Information Technology of Wind-Energetic Tasks Solving

A. B. Rykhlov

Theoretic basis of all-purposes climatic-information technology estimation of potential and utilize wind-energetic resources and wind-energetic plant service conditions are developed. Acceptable error of wind-energetic characteristics spatial renewal, wide range of facilities, usability and other qualities of this technology are conclusive proof for its application in stage of preproject development.

Key words: wind climate, wind speed distribution, wind resources, climate, height change, period of service, downtime.

Разработке методик обработки ветровых данных для решения задач ветроэнергетики посвящены многие работы как отечественных, так и зарубежных ученых. Среди них особо выделяется три направления исследований, посвященных разработке ветроэнергетического кадастра (ВЭК) [1–7], оценке производительности ветроэнергетической установки (ВЭУ) и оптимального размещения их по территории [2, 8–16].

Для того чтобы определить производительность ВЭУ и режим ее работы в том или ином районе, необходимо располагать соответствующей информацией о ветре. Ранее в качестве таковой использовали в основном статистику распределения: среднюю скорость ветра (v), коэффициент вариации и коэффициент асимметрии срочных значений. Рассчитать их не представляет труда для тех пунктов и на тех уровнях, где проводятся наблюдения за ветром [17, 18]. Однако ВЭУ размещаются, как правило, вдали от метеорологических и аэрологических станций, а высота оси ветроколеса варьирует в широких пределах. Поэтому возникает задача восстановления режима ветра в любой точке приземного

слоя атмосферы и на той высоте, где располагается ось ветроколеса ВЭУ.

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 [19]. После ее «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.

Установленные нами закономерности режима скоростей ветра на уровне метеостанций [20, 21] и изменения их с высотой на юго-восточной территории России (ЕТР) [22] дадут возможность разработать новую технологию решения ветроэнергетических задач для этого региона. Полученное в [21] ключевое уравнение

$$P(v) = \exp \left[-0,88 \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^{1,37} \right] \quad (1)$$

позволяет при использовании средней скорости ветра \bar{v} научно обосновать режим скоростей ветра v на любой высоте и соответственно оценить потенциальные и утилизируемые ветроэнергетические ресурсы, а также решить все другие задачи использования ВЭУ. Среднюю скорость \bar{v}_z на требуемой высоте z можно рассчитать по формулам

$$\frac{\bar{v}_z}{\bar{v}_h} = \left(\frac{z}{h} \right)^m \quad (2)$$

или

$$\bar{v}_z = \bar{v}_h \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln h - \ln z_0} \quad (3)$$

Значения параметров m и z_0 определяют установленные нами эмпирические выражения: для средних годовых значений скорости ветра

$$z_0 = 381,6 \cdot e^{-1,66\bar{v}_h} \text{ или } m = 0,864 \cdot e^{-0,31\bar{v}_h}; \quad (4)$$

для средних месячных значений в период с сентября по май

$$z_0 = 335,9 \cdot e^{-1,60\bar{v}_h}, \quad (5)$$



$$m = 0,798 \cdot e^{-0,28\bar{v}_h}, \quad (6)$$

и в период с июня по август

$$z_0 = 228,5 \cdot e^{-1,71\bar{v}_h}, \quad (7)$$

$$m = 0,798 \cdot e^{-0,28\bar{v}_h}, \quad (8)$$

где \bar{v}_h – средняя скорость ветра на уровне флюгера h .

Эти уравнения являются основой решения почти всех ветроэнергетических задач на любой высоте приземного 150–200-метрового слоя атмосферы для всех известных на сегодня ВЭУ. Ранее отмечалось, что для целей ветроэнергетики с использованием климатологической информации необходимо решить 3 задачи:

- 1) дать климатологическую оценку ветроэнергетических ресурсов и выбрать тип ВЭУ с учетом ее производительности и места размещения;
- 2) выявить режим работы и эксплуатации ВЭУ;
- 3) сконструировать ВЭУ и обосновать их прочностные характеристики.

Разработанные нами физико-статистические модели климатологической оценки ветроэнергетических ресурсов на уровне оси ветроколеса позволяют решить эти задачи самым оптимальным образом. Входным параметром в разработанную модель является средняя месячная или годовая скорость ветра. Для ее определения можно использовать карты географического распределения средних годовых скоростей ветра, также эти данные могут быть взяты из справочников по климату. Последние для рассматриваемого региона имеются для более чем 200 станций [23, 24]. К вопросу интерполяции средней месячной или годовой скорости ветра вблизи земной поверхности для интересующего изыскателя района следует подходить с большой осторожностью.

Метод оценки производительности ВЭУ. Как было показано выше, для обоснования использования ВЭУ в том или ином районе можно применить значение средней скорости ветра. При этом в грубом приближении уровень $\bar{v} \geq 5$ м/с характеризует высокий ветроэнергетический потенциал данной местности [3]. Однако стоит учитывать то, что куб средней не равен среднему кубу скорости ветра, поэтому при таком подходе возможны ошибки, приводящие к занижению фактического значения ветроэнергетического потенциала, связанные с методом его определения. Так, в начале XX в. для этих целей часто использовали только среднюю скорость ветра, поэтому удельная мощность ветра занижалась более чем в 3 раза. При использовании повторяемости различных ветров в виде дискретных градаций занижали оценки на 15%. Лишь удачно подобранная функция распределения скоростей ветра, учитывающая его непрерывность, дает результаты, близкие к действительности.

Являясь горизонтальным движением воздуха, ветер, как и всякое движение, обладает определённой кинетической энергией [1, 3]. Потенциальные запасы энергии ветра связаны со скоростью ветра и описываются выражением

$$W = \frac{1}{2} \rho S v^3 t, \quad (9)$$

где ρ – плотность воздуха; S – площадь поперечного сечения (ометаемая площадь), через которое проходит поток воздуха за время t . Отсюда удельная ветроэнергетическая мощность воздушного потока, приходящаяся на единицу площади в единицу времени, будет равна

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho v^3. \quad (10)$$

Временной изменчивостью ρ в приземном слое обычно пренебрегают, поскольку её вариации не превышают 10% значения плотности воздуха для стандартной атмосферы ($\rho_c = 1,226$ кг/м³). Как показали наши расчеты, с использованием формулы $\rho = \frac{P}{RT}$, средних месячных (годовых)

значений атмосферного давления и температуры воздуха это вполне допустимо. В формуле P – атмосферное давление, T – виртуальная температура воздуха, R – удельная газовая постоянная сухого воздуха равная 287 Дж/кг·К. На рассматриваемой территории средние значения плотности воздуха, по нашим оценкам, составляют 1,224–1,228 кг/м³. Отклонения от средней стандартной плотности не превышают 3%.

Каждая конкретная скорость ветра вносит свой вклад в среднее значение удельной мощности ветрового потока, но этот вклад существенно зависит от ее повторяемости. Для иллюстрации этой зависимости на рисунке представлена компиляция двух графиков, один из которых характеризует прямопропорциональную зависимость удельной мощности ветрового потока от куба середины градации скорости ветра, а второй – повторяемость этой градации. При построении были использованы соответствующие данные по г. Ершову (Саратовская область) на высоте 10 м. Удельная мощность ветрового потока для конкретных градаций определялась нами по формуле

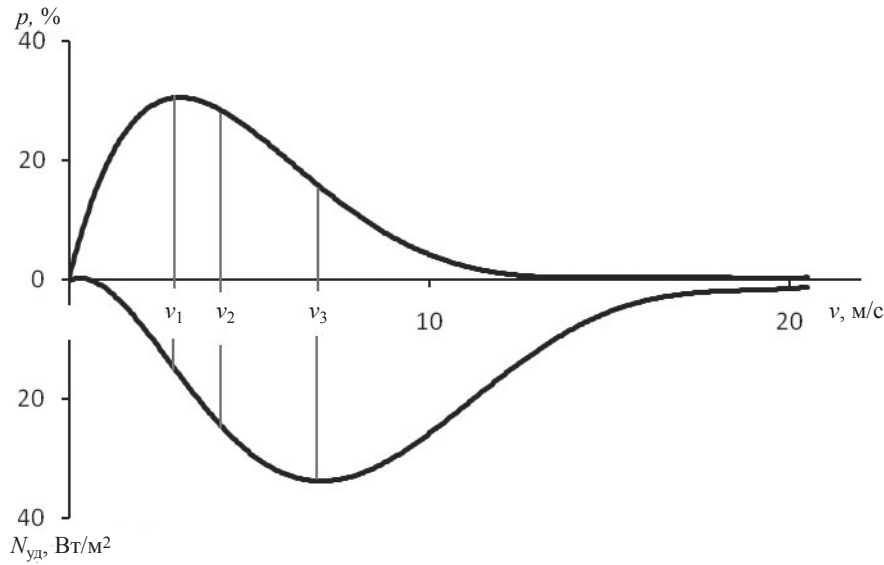
$$N_{уд} = 0,613 \cdot v_i^3 \cdot p_i \quad (0,613 = 0,5 \cdot 1,226),$$

где v_i – середина градации; p_i – повторяемость i -й градации.

Вследствие кубической зависимости удельной мощности ветрового потока от скорости ветра наибольший вклад в формирование ее среднего значения дают не наиболее часто наблюдаемые и даже не средние скорости, а превышающие их в 1,5–2 раза.

При взаимодействии ветра с ВЭУ, он будет совершать работу $A_{ветра}$ по вращению ветроколеса, тогда, согласно физическому смыслу кинетической энергии,

$$A_{ветра} = W. \quad (11)$$



Повторяемость скоростей ветра p и распределение годовой удельной мощности $N_{уд}$ на высоте 10 м в г. Ершов (Саратовская область): v_1 – наиболее часто наблюдаемая скорость (2,5 м/с); v_2 – средняя скорость ветра (5,0 м/с); v_3 – скорость, обеспечивающая наибольший вклад в годовую выработку энергии (8,5 м/с)

Если известна плотность распределения скорости ветра $f(v)$, то потенциальную среднюю удельную мощность ветрового потока можно оценить по формуле

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv. \quad (12)$$

В качестве $f(v)$ в формуле (12) нами предлагается использовать установленный нами закон, т. е. формулу (1). Однако $P(v)$ в равенстве (1) является интегральной функцией распределения скоростей ветра, в то время как $f(v)$ – дифференциальная вероятность скоростей ветра. Можно показать, что произведя дифференцирование $F(v) = 1 - P(v)$ по v

$$F'(v) = e^{-\beta \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^{\gamma}} \beta \gamma \bar{v}^{-\gamma} v^{\gamma-1}, \quad (13)$$

а затем, заменив в равенстве (12) $f(v) = F'(v)$, получим

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 e^{-\beta \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^{\gamma}} \beta \gamma \bar{v}^{-\gamma} v^{\gamma-1} dv. \quad (14)$$

Выполнив интегрирование выражения (14), получим окончательную формулу для расчёта удельной мощности ветрового потока, основанную на параметрах β и γ обобщенного закона распределения, разработанного нами с учетом рекомендаций [25], в виде

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho \beta^{-\frac{3}{\gamma}} \bar{v}^3 \Gamma\left(\frac{3}{\gamma} + 1\right), \quad (15)$$

где Γ – гамма-функция [при расчетах используется свойство $\Gamma(x) = (x - 1) \cdot \Gamma(x - 1)$];

\bar{v} – средняя скорость ветра. При известных параметрах $\beta = 0,88$ и $\gamma = 1,37$ для нахождения $N_{уд}$ на требуемой высоте необходимы только данные о средней скорости ветра на уровне оси ветроколеса. Используя значения параметров β и γ и значения гамма-функции от них, приведем формулу (15) к виду

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho \cdot 3,176 \cdot \bar{v}^3. \quad (16)$$

Как следует из формулы (16), действительно, вблизи земной поверхности удельная мощность ветрового потока пропорциональна кубу средней скорости, но она в рассматриваемом регионе должна быть увеличена в 3,176 раз. При оценке ветроэнергетического потенциала на других уровнях приземного слоя атмосферы (оси ветроколеса) необходимо учитывать интенсивность изменения средней скорости ветра с высотой.

При использовании распределения Вейбулла формула (15) преобразуется к виду

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho \beta^3 \Gamma\left(\frac{3}{\gamma} + 1\right). \quad (17)$$

Здесь β и γ – параметры распределения Вейбулла.

Библиографический список

1. Абдрахманов Р. С., Переведенцев Ю. П. Возобновляемые источники энергии. Казань, 1992. 134 с.
2. Борисенко М. М., Соколова С. Н., Корнюшин О. Г. Исследование климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов // Гидрометеорология и метеорология : обзорная информация. ВНИИГМИ-МЦД. 1987. № 4. 50 с.



3. Дробышев А. Д., Пермяков Ю. А. Ветровая энергия и ее возможный вклад в ресурсосбережение и экологию Прикамья. Пермь, 1997. 122 с.
4. Заварина М. В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. Л., 1971. 162 с.
5. Переведенцев Ю. П., Николаев А. А. Климатические ресурсы солнечной радиации и ветра на территории Среднего Поволжья и возможности их использования в энергетике. Казань, 2002. 122 с.
6. Пермяков Ю. А., Булычева О. А. О некоторых аспектах составления ветрового кадастра Прикамья : межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1992. С. 50–56.
7. Подтягин М. Е. Кривые распределения ветров // Энергетические ресурсы СССР : в 3 т. М., 1938. Т. 2. С. 339–346.
8. Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. Оценка ветроэнергетических ресурсов на территории России // Тр. ГГО. 2008. Вып. 557. С. 53–66.
9. Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л. Исследование климатических ресурсов энергии ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над территорией Ленинградской области // Тр. ГГО. 2010. Вып. 561. С. 104–114.
10. Ляхтер В. М. Ветровые электростанции большой мощности : обзорная информация // Энергетика и электрофикация. 1987. № 1. С. 31–72.
11. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. М., 1975. 177 с.
12. Adell L., Zubiaur R., Martin F., Perrando F., Moreno P., Varona L., Pontofa A. Development of a methodology for the estimation of wind energy resources in relatively large areas // Sol. Energy. 1987. Vol. 38, № 4. P. 281–295.
13. Baker R. W., Henson E. W. Wind power potential in the Pacific Northwest // J. Appl. Meteorol. 1978. Vol. 17, № 12. P. 1814–1826.
14. Drugan L. M., Goldrelch Y., Maximob Z. Wind energy

- survey in the Neger (Israel) // Appl. Geogr. 1986. Vol. 6, № 3. P. 241–254.
15. Essenwanger O. Probleme der Windstatistik // Meteorologische Rundschau, 1959. 2 März–Apr.
16. Golding E. W., Harris R. I. The generation of electricity by wind power. N. Y., 1977. 332 p.
17. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок : метод. указания : руководящий документ. М., 1991. 57 с.
18. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Л., 1989. 80 с.
19. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики / под ред. д-ра геогр. наук, проф. Н. В. Кобышевой. СПб., 2008. 336 с.
20. Рыхлов А. Б. Климато-информационная модель режима скоростей ветра на высотах приземного слоя атмосферы над ЕЧР для решения ветроэнергетических задач // Экология : синтез естественно-научного, технического и гуманитарного знания : всерос. науч.-практ. конф. Саратов, 2010. С. 402–404.
21. Рыхлов А. Б. Разработка принципов совмещения и обобщения законов распределения скоростей ветра на ЮВ ЕТР // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. 2010. Т. 10. Сер. Науки о Земле, вып. 2. С. 37–44.
22. Рыхлов А. Б. Закономерности изменения средней скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на ЮВ ЕТР для решения задач ветроэнергетики // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. 2010. Т. 10. Сер. Науки о Земле, вып. 2. С. 37–44.
23. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л., 1988. Сер. 3. Вып. 12–13.
24. Справочник по климату СССР : в 5 ч. Ч. 3. Л., 1967. Вып. 12–13.
25. Милевский В. Ю. Методика исследования скоростных роз и скоростных роз диаграмм ветра // Тр. ГГО. 1960. Вып. 113. С. 57–70.

УДК [502.3:631.416.8] (470.44 – 25)

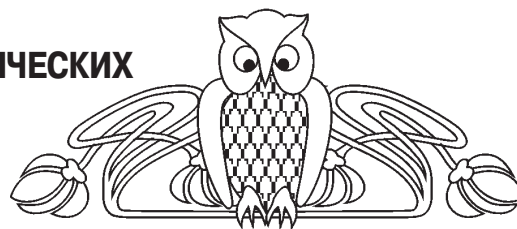
ДИНАМИКА ТЕХНОГЕННЫХ СНЕГОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА ТЕРРИТОРИИ г. САРАТОВА ЗА 1992–2010 годы

В. З. Макаров, М. В. Решетников¹,
О. В. Суровцева, А. Н. Чумаченко¹

Саратовский государственный университет
E-mail: geogr@sgu.ru, rmv85@list.ru, chumach1313@rambler.ru

В статье рассмотрены результаты снегогеохимической съёмки территории г. Саратова в 1992, 1994, 1997 гг. и в начале 2000-х гг., выполненной сотрудниками географического и геологического факультетов СГУ. Выявлено существенное уменьшение площади загрязнения снежного покрова выбросами промпредприятий в начале 2000-х гг. по сравнению с 90 годами прошлого века. Обнаружено резкое возрастание загрязнения снега вдоль транспортных магистралей и вокруг крупных действующих предприятий.

Ключевые слова: техногенные геохимические аномалии, снегогеохимическая съёмка, г. Саратов, геохимический мониторинг городской территории.



Dynamic of Snow-Geochemical Anomalies in the Saratov City Territory (over a Period of 1992–2010)

V. Z. Makarov, M. V. Reshetnikov, O. V. Surovtseva,
A. N. Chumachenko

The article shows results of snow-geochemical survey in Saratov city territory in 1992, 1994, 1997 and at the beginning of 2000th, that was made by the staff of geographical and geological faculties of Saratov State University. The research revealed essential area decrease of snow cover pollution of industrial emission at the beginning of 2000th as compared with 1990th. Abrupt snow pollution increase along the transport mains and around the large working enterprises.

Key words: anthropogenic geochemical anomalies, snow-geochemical survey, Saratov, geochemical monitoring of urban territory.