

Оценка энергетического потенциала воздушного потока

*В.Г. Петько, д.т.н., профессор, И.А. Рахимжанова,
д.с.-х.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Ветер является одним из доступных источников энергии. Энергия W_i воздушного потока, проходящего через ометаемую поверхность ветротурбины за определённый промежуток времени t_i , в течение которого скорость ветра можно считать постоянной:

$$W_i = P_i t_i, \quad (1)$$

где $P_i = \rho S V_i^3 / 2000$ [1] – мощность воздушного потока в промежутке времени t_i , кВт;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

S – площадь ометаемой поверхности, м²;

V_i – скорость ветра в рассматриваемый промежуток времени, м/с;

Тогда годовой объём энергии, переносимой воздушным потоком, равен:

$$W_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n P_i t_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n t_i = 8760$ – число часов в году.

Количественно эта энергия может быть определена, если известна повторяемость скоростей ветра в течение года. Этой цели вполне соответствует представленная ниже классическая таблица повторяемости скоростей ветра, составленная исследователем М.М. Поморцевым [2].

Графическое представление данных этой таблицы приведено на рисунке 1 [4].

Материал и методы исследования. При табличном и графическом представлении повторяемости скоростей ветра чрезвычайно трудно или вообще невозможно произвести анализ и расчёты силовых и энергетических характеристик ветроустановок (табл. 1). Для этого необходимо аппроксимировать вышеприведённые данные аналитической зависимостью. В наибольшей степени для аппроксимации распределения скоростей ветра подходит функция плотности распределения вероятности Вейбулла [5]:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha},$$

где x – значение, для которого вычисляется функция, в данном случае это скорость ветра V , м/с; α и β – параметры распределения, зависящие от средней скорости ветра (α – определяет форму распределения, β – определяет масштаб).

Подбором параметров α и β можно добиться наиболее полного совпадения кривых плотности распределения для каждой из средних скоростей

ветра, представленных в таблице, и кривых, построенных по распределению Вейбулла. Данные параметры в сильной степени зависят от средней скорости ветра. Для того чтобы их величины можно было использовать в аналитических расчётах, зависимости этих параметров нами в достаточной мере точно аппроксимированы степенной и линейной функциями:

$$\alpha_a = 1,45V_c^{0,33} \text{ и } \beta_a = 1,0875V_c + 0,625.$$

Подобранные экспериментально параметры α_2 и β_2 и параметры, найденные по аппроксимирующим зависимостям, α_a и β_a для средних скоростей ветра от 1 до 10 м/с приведены в таблице 2.

Степень соответствия параметров, найденных по аппроксимирующим выражениям, и параметров, полученных в результате подбора, проиллюстрирована графиками, изображёнными на рисунках 2 и 3.

Полученные подбором значения параметров распределения α_2 и β_2 позволяют построить кривые распределения плотности вероятности $f_B(V)$ для фиксированных (заданных в таблице 1) значений средних скоростей ветра и сравнить их с распределением $f_T(V)$, заданным таблицей 1.

Степень их совпадения для некоторых средних скоростей ветра проиллюстрирована на рисунке 4.

В отличие от параметров распределения α_2 и β_2 , полученных в результате теоретического эксперимента, параметры, найденные по аппрок-

1. Повторяемость скоростей ветра (число часов наблюдения t_{ij} в течение года при скорости ветра V_i и средней скорости V_{cj}) [3]

$j, (V_{cj})$ $i, (V_i),$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	2230	876	500	307	175	87	52	44	18	0
1	–	3600	2020	1030	630	376	228	149	88	62	18
2	–	2190	2590	1700	1070	684	420	262	187	140	70
3	–	653	2020	1990	1445	1003	700	462	334	228	180
4	–	87	873	1710	1610	1310	963	700	492	350	280
5	–	–	330	1050	1445	1445	1210	930	685	500	394
6	–	–	51	525	1070	1310	1320	1100	876	700	520
7	–	–	–	193	640	1050	122	1180	1030	840	684
8	–	–	–	62	315	700	1000	1120	1100	960	788
9	–	–	–	–	152	376	700	963	1033	1000	876
10	–	–	–	–	52	183	438	720	886	960	896
11	–	–	–	–	26	70	262	500	700	850	876
12	–	–	–	–	–	52	131	312	516	700	796
13	–	–	–	–	–	26	52	170	350	520	688
14	–	–	–	–	–	–	26	70	220	368	520
15	–	–	–	–	–	–	–	36	115	250	420
16	–	–	–	–	–	–	–	18	61	157	290
17	–	–	–	–	–	–	–	16	26	87	193
18	–	–	–	–	–	–	–	–	17	52	131
19	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18	79
20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–0	61
Σt_{ij}	8760	8760	8760	8760	8762	8760	8757	8760	8760	8760	8760

симирующим аналитическим зависимостям α_a и β_a , позволяют построить кривые распределения плотности вероятности $f_{в}(V)$ для любых значений средних скоростей ветра. Визуально его можно сравнить с распределением $f_{т}(V)$, воспользовавшись графиками, изображёнными на рисунке 5.

Как в том, так и в другом случае наблюдается вполне приемлемое соответствие исходного распределения плотности вероятности, заданного та-

2. Параметры распределения, найденные экспериментально (α_3, β_3) и определённые по аппроксимирующим аналитическим выражениям (α_a, β_a)

$V_c, \text{ м/с}$	α_3	α_a	β_3	β_a
1	1,4	1,731674	1,7	1,7125
2	1,8	2,036714	2,7	2,8
3	2,1	2,269652	3,9	3,8875
4	2,145	2,462123	4,9	4,975
5	2,45	2,628107	6	6,0625
6	2,7	2,775166	7,1	7,15
7	2,8	2,907907	8,2	8,2375
8	2,95	3,029369	9,2	9,325
9	2,99	3,141674	10,3	10,4125
10	3,05	3,246372	11,5	11,5

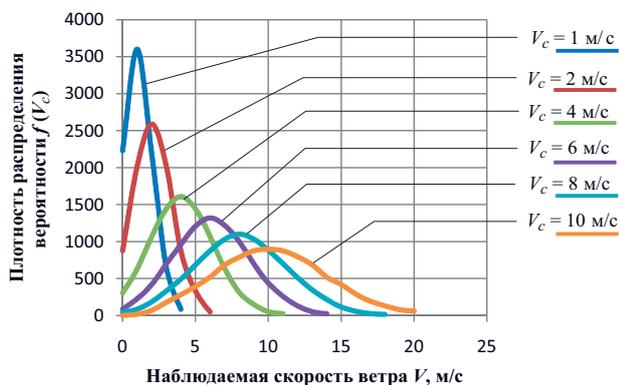


Рис. 1 – Графики повторяемости скоростей ветра, построенные по данным Т1

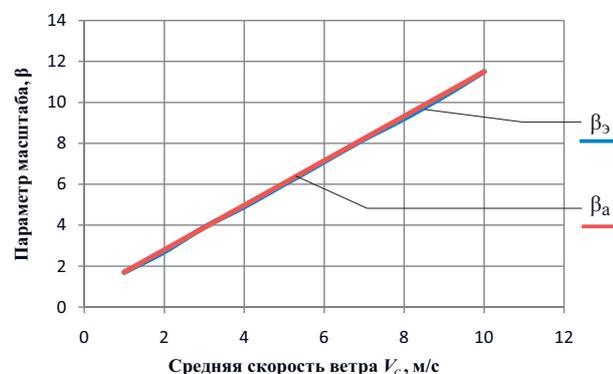


Рис. 3 – Кривые зависимости параметров β_3 и β_a от средней скорости ветра

блицей 1, и распределения плотности вероятности скоростей ветра по формуле Вейбулла.

Результаты исследования. Полученные аналитические выражения распределения плотности вероятности скоростей ветра расширяют возможности оценки энергетического потенциала воздушного потока для любой из средних скоростей ветра (V_c) в любом заданном диапазоне изменения наблюдаемых скоростей ветра (V). Наиболее показательной в этом плане является годовая удельная энергия ($W_{гва}$), представляющая собой энергию в киловатт-часах/м², переносимую за год струёй воздуха поперечным сечением 1 м² при заданной средней скорости ветра и плотности распределения скоростей $f_{ва}$. Уравнение для её вычисления с учётом (2) имеет следующий вид:

$$W_{гва}(V_c) = 8760 \int_{V=V_{\min}}^{V=V_{\max}} p(V) f_{ва}(V) dV, \quad (3)$$

где $p(V) = \rho V^3 / 2000$ – удельная мощность воздушного потока поперечным сечением 1 м² при скорости V , кВт.

Результаты расчётов удельной энергии по данному аналитическому распределению плотности скоростей для средних скоростей ветра, заданных в таблице 1, приведены в таблице 3 (стр. 1).

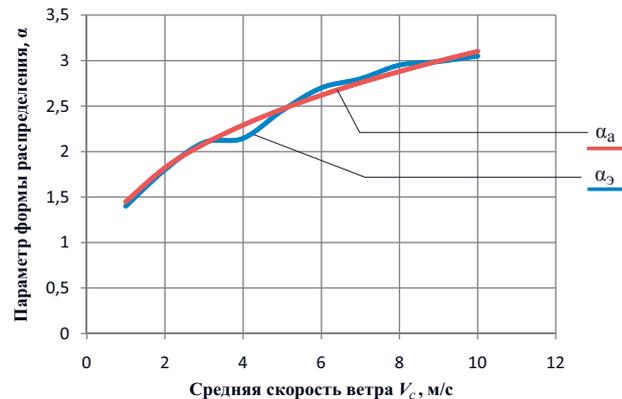


Рис. 2 – Кривые зависимости параметров α_3 и α_a от средней скорости ветра

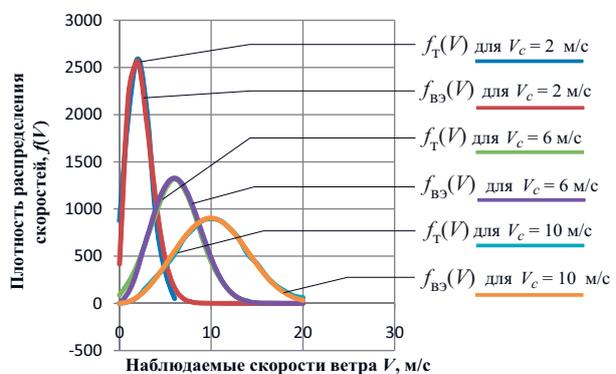


Рис. 4 – Кривые распределения плотности скоростей ветра, построенные по данным таблицы 1 ($f_{т}(V)$) и распределению Вейбулла ($f_{в3}(V)$) с параметрами α_3 и β_3

3. Результаты расчёта удельной энергии

№№ строк	j	V _c , м/с										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	W _{ГВа} , кВт·ч/м ²	0	60,5	183,6	423,4	816,3	1400	2211	3287	4661	6349	8311
2	W _{ГТ} , кВт·ч/м ²	0	28,6	119,6	335,7	736,1	1287	2038	31,33	4472	6157	8504

В этой же таблице (стр. 2) приведены значения удельной энергии для средних скоростей ветра V_{cj}, рассчитанные по исходному распределению, заданному таблицей 1. Расчёт осуществлён суммированием энергий по каждому из диапазонов наблюдаемых скоростей:

$$W_{ГТj} = \sum_{i=0}^{11} P_{ij} t_{ij} = \sum_{i=0}^{11} \rho V_i^3 t_{ij} / 2000.$$

Кривые зависимости удельной энергии от средней скорости ветра W_{ГТ} = φ_Т(V_c) и W_{ГВа} = φ_{Ва}(V_c), построенные соответственно по данным таблицы 1 и по распределению Вейбулла, изображены на рисунке 6.

В области средних скоростей ветра, при которых установка и эксплуатация ветроагрегатов экономически оправдана, расхождение результатов не превышает 10%, что для оценочных расчётов вполне приемлемо.

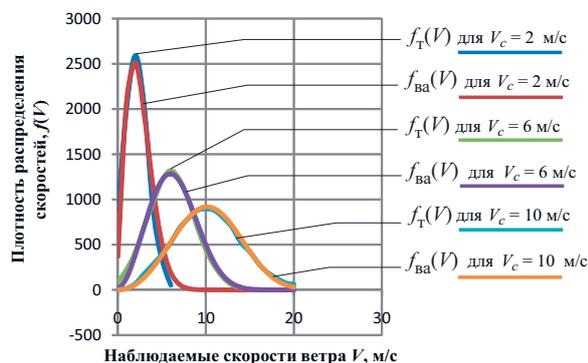


Рис. 5 – Кривые распределения плотности скоростей ветра, построенные по данным таблицы 1 (f_т(V)) и распределению Вейбулла (f_{ва}(V)) с параметрами α_a и β_a

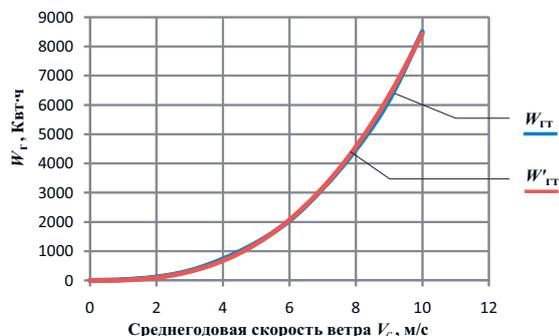


Рис. 7 – Кривая зависимости удельной годовой энергии ветра от средней скорости, построенная по табличным данным W_{ГТ} = φ_Т(V_c), и эта же зависимость, построенная по результату аппроксимации W'_{ГТ} = φ'_Т(V_c)

Для упрощения расчётов зависимости W_{ГТ} = φ_Т(V_c) и W_{ГВа} = φ_{Ва}(V_c) аппроксимированы степенной функцией W'_{ГТ}(V_c) = mV_cⁿ. При m = 15 и n = 2,75 наблюдается фактически полное совпадение кривых W_{ГТ} = φ_Т(V_c) и W'_{ГТ}(V_c), а при m = 21 и n = 2,6 – кривых W_{ГВа}(V_c) и W'_{ГВа}(V_c) (рис. 7, 8).

Как видим по результатам аппроксимации, в отличие от мощности воздушного потока, пропорциональной кубу скорости ветра (1), годовая энергия ветрового потока с увеличением средней скорости ветра нарастает более медленно (степень 2,75 и 2,6).

Выводы. Для упрощения теоретического анализа силовых и энергетических характеристик ветроустановок удобнее всего табличное представление повторяемости скоростей ветра заменить аналитическим, увязанным со средней скоростью ветра. Для такого представления наиболее подходит двухпараметрическое распределение

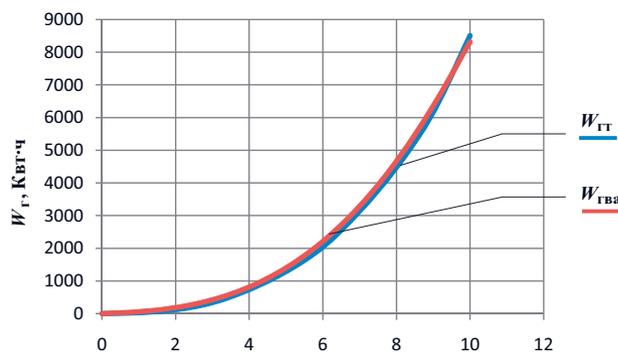


Рис. 6 – Зависимости W_{ГТ} = φ_Т(V_c) и W_{ГВа} = φ_{Ва}(V_c)



Рис. 8 – Кривая зависимости удельной годовой энергии ветра от средней скорости, построенная по табличным данным W_{ГВа} = φ_{Ва}(V_c), и эта же зависимость, построенная по результату аппроксимации W'_{ГВа} = φ'_{Ва}(V_c)

плотности вероятности Вейбулла. Зависимости от средней скорости ветра найденных в работе параметров этого распределения, обеспечивающих наиболее полное совпадение кривых распределения плотности вероятности, заданных таблично и по распределению Вейбулла, аппроксимированы линейной и степенной функциями. Это позволило с достаточной для практических расчётов точностью воспроизвести в аналитическом виде распределение плотности вероятности скоростей ветра при любых средних скоростях ветра и, как следствие, оценить удельную энергию потока воздуха переносимую им в течение года. Полученные результаты могут быть

использованы при оптимизации конструктивных и режимных параметров проектируемых и находящихся в эксплуатации ветроагрегатов.

Литература

1. Обухов С.Г. Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов. Учебное пособие. Томск, 2008, С. 89.
2. Поморцев М.М. О законе распределения скоростей ветра. Записки по гидрографии. Вып XV. 1894.
3. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. М., 1948, 327 с.
4. Колесников А. EXCEL 2000 (русифицированная версия). К.: Издательская группа BHV, 1999. С. 261 – 280.
5. Распределение Вейбулла. Непрерывные распределения в MS EXCEL/ [Электронный ресурс]. URL:<http://www/exel2.ru/articles/raspredelenie-veybulla-nepreryvnye-raspredeleniya-v-ms-excel> (дата обращения 03.06.2018).