

## Проверка применения закона Вейбулла для описания изменения скорости ветра по различным его направлениям

*В.Н. Азаров, Ю.П. Иванова, Т.В. Соловьева, О.О. Иванова, Д.М. Лепехина*

*Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета*

**Аннотация:** В статье рассмотрены направления и скорости воздушного потока, свойственные линейному городу Волгограду. Осуществлена проверка закона Вейбулла для различных скоростей ветра по различным направлениям ветра, характерным для Волгограда.

**Ключевые слова:** климат, линейный город, скорость ветра, направление ветра, закон распределения, закон распределения, закон Вейбулла, логарифмически нормальный закон, перенос примесей.

Загрязнение атмосферного воздуха крупных промышленных городов является основной проблемой современности. Главные источники негативного воздействия — автомобильный транспорт и промышленные предприятия, однако большое значение при распространении примесей имеют метеорологические условия. Ветровой режим оказывает существенное влияние на загрязнение атмосферного воздуха городской среды, поэтому целесообразно исследовать закономерности повторяемости скоростей ветрового потока. Ранее рядом авторов проводились изучения распространения повторяемости скоростей ветра, характерных для г. Волгограда, корреляционный анализ которых показал, что практически отсутствует взаимосвязь между скоростью и направлением ветрового потока [1,2]. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что распределение скоростей ветра наилучшим образом описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла [1-3]. Однако, при обработке данных среднесуточных показателей линейного города Волгограда за период 2016-2020 гг. по 8 румбам, полученных на основе дневника погоды Gismeteo [4], было установлено, что не во всех случаях распределение скоростей ветра описывается законом Вейбулла. Рассматривались данные о режимах ветра в дневное время в г. Волгограде за 5 лет, с 2016 по 2020 годы.

---

Все данные были разбиты по восьми направлениям. Объемы выборок по различным направлениям указаны в табл. 1.

Таблица 1

Объемы выборок по различным направлениям распространения ветра

Направление ветра	Объем выборки
Юг	103
Юго-восток	363
Восток	254
Северо-восток	156
Север	93
Северо-запад	194
Запад	141
Юго-запад	228

Решалась задача об установлении закона распределения скоростей воздушного потока по различным направлениям. В первую очередь проверялся закон Вейбулла, а также нормальный, логнормальный, смешанный гауссовский и Джонсона SB законы. Проверка осуществлялась по программе STATISTIKA 10 [5,6].

Для проверки законов были использованы критерий согласия Хи-квадрат Пирсона при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , а также тест Колмогорова-Смирнова.

В таблице 2 представлены значения оценочных параметров среднесуточных скоростей воздушного потока  $V(m/c)$  для северного направления ветра за 2016-2020 гг.

Наблюдаемое значение критерия  $\chi^2 = 8,95$ . По таблице критических точек Хи-квадрат и по заданному уровню значимости  $\alpha = 0,05$  и числу степеней свободы  $r = 9$  находим критическую точку  $\chi_{кр}^2 = 16,9$ . Так как  $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ , то гипотеза о законе Вейбулла согласуется с экспериментальными данными. Также для проверки закона использовался тест Колмогорова-

Смирнова, который показал отсутствие различий между наблюдаемым распределением признака и ожидаемым законом Вейбулла ( $p$ -знач. = 0,89).

Таблица 2

Итоговые статистики скорости воздушного потока  $V$

Оценки параметров	Значения
Среднее значение	3,763
Дисперсия	3,878
Стандартное отклонение	1,969
Мода	<u>Множест.</u>
Медиана	4
Минимальное значение	1
Максимальное значение	11
<u>Экссесс</u>	1,67
Асимметрия	0,95

Интегральная функция закона Вейбулла имеет вид:

$$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k}, \text{ где} \quad (1)$$

$k$  — параметр формы распределения,  $\beta$  — параметр масштаба распределения,  $V$  (м/с) — скорости воздушного потока; а плотность распределения задается формулой:

$$f(V, k, \beta) = \frac{k}{\beta} \left(\frac{V}{\beta}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k} = \frac{k}{\beta^k} V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k}. \quad (2)$$

Были получены значения параметров, а именно —  $\beta = 4,26$ ;  $k = 2,03$ .

Функция плотности и интегральная функция данного распределения будут иметь вид:

$$f(V, k, \beta) = 0,107 \cdot V^{1,03} e^{-\frac{V^{2,03}}{18,89}}, \quad F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,03}}{18,89}} \quad (3)$$

На рисунке 1 изображена гистограмма для наблюдаемых и теоретических значений скоростей ветра  $V$  (м/с).

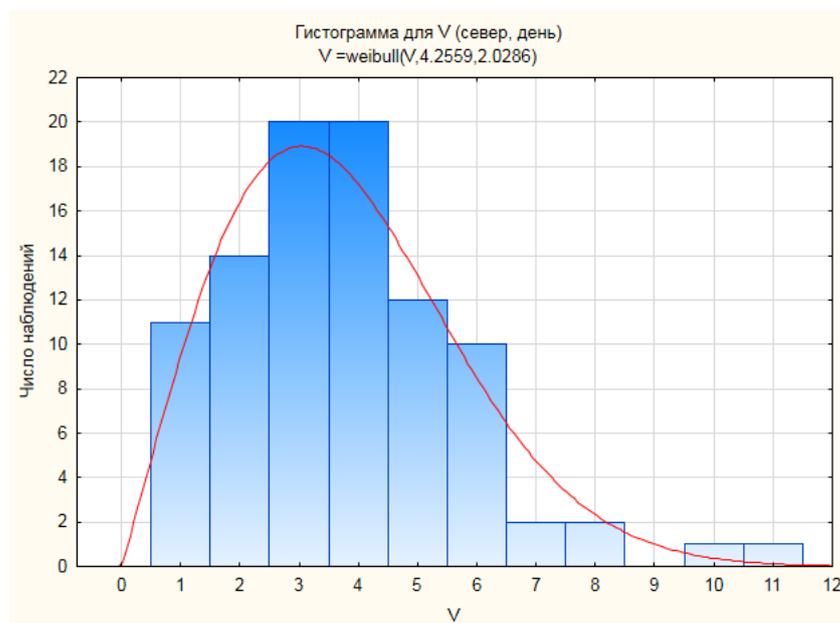


Рис. 1 - Гистограмма скоростей воздушного потока

В таблице 3 представлены значения оценочных параметров среднесуточных скоростей воздушного потока  $V(m/c)$  для западного направления ветра за 2016-2020 годы (объем выборки составил 141 измерение).

Таблица 3

Итоговые статистики скорости воздушного потока  $V$

Оценка параметров	Значения
Среднее значение	6,319
Дисперсия	8,233
Стандартное отклонение	2,869
Мода	7
Медиана	6
Минимальное значение	1
Максимальное значение	12
Экссесс	-0,724
Асимметрия	0,103

Проверка показала, что гипотеза о нормальном законе согласуется с экспериментальными данными. Наблюдаемое значение критерия  $\chi^2 = 8,95$ ;

число степеней свободы  $r = 12$ ; критическая точка  $\chi_{кр}^2 = 21$ . Так как  $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ , то гипотеза о нормальном законе согласуется с экспериментальными данными. Были получены следующие значения параметров, характеризующих данный закон:  $a = 6,319$ ;  $\sigma = 2,869$ . Функция плотности и интегральная функция данного распределения будут иметь вид:

$$f(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-a)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2,869\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-6,312)^2}{16,462}} \quad (4)$$

$$F(V) = 0,5 + 0,5\phi\left(\frac{V-a}{\sigma}\right) = 0,5 + 0,5\phi\left(\frac{V-6,312}{2,869}\right) \quad (5)$$

где  $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  - интегральная функция Лапласа,  $a$  - среднее значение,  $\sigma$  - стандартное отклонение.

(6)

На рисунке 2 изображена гистограмма для наблюдаемых и теоретических значений скоростей ветра  $V$  (м/с).

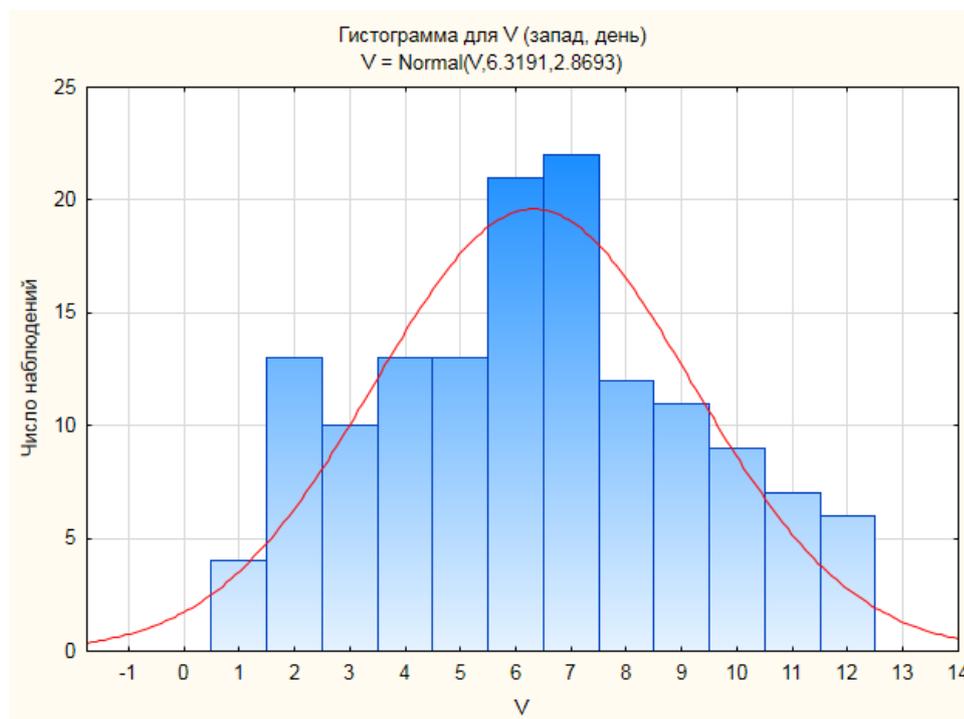


Рис. 2 - Гистограмма распределения скоростей воздушного потока

Таблица 4

Функция плотности и интегральная функция распределения Вейбулла для различных направлений ветра

Направление ветра	Функция плотности	Интегральная функция
Юг	$f(V, k, \beta) = 0,024 \cdot V^{1,56} e^{-\frac{V^{2,56}}{104,6}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,56}}{104,6}}$
Юго-восток	$f(V, k, \beta) = 0,01 \cdot V^{1,98} e^{-\frac{V^{2,98}}{289,5}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,98}}{289,5}}$
Восток	$f(V, k, \beta) = 0,011 \cdot V^{1,84} e^{-\frac{V^{2,84}}{251}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,84}}{251}}$
Северо-восток	$f(V, k, \beta) = 0,026 \cdot V^{1,44} e^{-\frac{V^{2,44}}{92,7}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,44}}{92,7}}$
Север	$f(V, k, \beta) = 0,107 \cdot V^{1,03} e^{-\frac{V^{2,03}}{18,89}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,03}}{18,89}}$
Северо-запад	$f(V, k, \beta) = 0,015 \cdot V^{1,66} e^{-\frac{V^{2,66}}{177}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,66}}{177}}$
Запад	-	-
Юго-запад	$f(V, k, \beta) = 0,02 \cdot V^{1,4} e^{-\frac{V^{2,4}}{121,9}}$	$F(V, k, \beta) = 1 - e^{-\frac{V^{2,4}}{121,9}}$

В таблице 5 приведены параметры статистики скорости воздушного потока  $V$  по 8 румбам за период с 2016 по 2020 гг. соответственно.

Таким образом, рассматривая скорость и направление ветрового потока как случайную величину, можно оценить возможность «негативных» направлений ветра для городской среды линейного города. Проведенный анализ данных сайта Gismeteo по городу Волгограду 2016-2020 г. показал, что повторяемость скоростей ветрового потока при всех его направлениях, кроме западного, подчиняется распределению Вейбулла, но их параметры  $\beta$  и  $k$  существенно отличаются, что отображено в таблице 6. При западном направлении повторяемость скоростей ветра подчиняется логарифмически нормальному закону [7-9]. Одной из основных задач системы мониторинга является совершенствование аналитической базы. Математические модели и программы, используемые для расчета, должны постоянно уточняться для

повышения точности прогноза [10,11]. Ранее полученные данные о подчинении ветра уточнены при использовании в качестве исходных данных среднесуточных показателей.

Таблица 5

Параметры статистики скорости воздушного потока  $V$  по 8 румбам за 2016-2020 гг.

Оценка параметров	Ю	ЮВ	В	СВ	С	СЗ	З	ЮЗ
Среднее значение	5,447	5,981	6,256	5,673	3,763	6,211	6,319	6,546
Дисперсия	5,348	4,787	5,551	6,196	3,878	6,427	8,233	8,401
Стандартное отклонение	2,312	2,188	2,356	2,489	1,969	2,535	2,869	2,898
Мода	5	6	6	4	Множест.	7	7	6
Медиана	5	6	6	5	4	6	6	6
Минимальное значение	2	2	1	1	1	2	1	1
Максимальное значение	11	12	15	14	11	14	12	19
Экссесс	-0,51	-0,41	0,58	0,02	1,67	-0,45	0,724	1,01
Асимметрия	0,38	0,34	0,36	0,57	0,95	0,35	0,103	0,65

Таблица 6

Значения параметров закона Вейбулла

Направление ветра	$\beta$	$K$
Юг	6,15	2,56
Юго-восток	6,7	2,98
Восток	7	2,84
Северо-восток	6,4	2,44
Север	4,26	2,03
Северо-запад	7,0	2,66
Запад	-	-
Юго-запад	7,4	2,4

Литература

1. Донцова Т. В. Балансовый метод оценки загрязнения воздушной среды крупных городов на принципах биосферной совместимости: дис. к-та техн. наук. Волгоград, 2016. 161 с.

2. Кузмичев А. А. Теоретические и экспериментальные исследования влияния городского атмосферного аэрозоля и параметров воздушной среды на загрязнение зданий и сооружений: дис. канд. техн. наук. Волгоград, 2019. 179 с.

3. Ионисян А. С. О целесообразности использования метода Зейделя при численном решении уравнения диффузии примеси в атмосфере // Проблемы физико-математических наук: материалы 48-й науч.-метод. конф. преподавателей и студентов "Университетская наука - региону". Ставрополь: Изд-во СГУ, 2003. С. 76-78.

4. Прогноз погоды. URL: [gismeteo.ru](http://gismeteo.ru)

5. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 543 с.

6. Боровиков А. В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Санкт-Петербург: Изд. дом «Питер», 2001. 656 с.

7. Иванова Ю. П., Соколова Е. В., Сахарова А.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Проверка выполнения закона Вейбулла для различных направлений ветра, характерных для линейного города Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 3(80). С. 134-141.

8. Иванова Ю.П., Соловьева Т.В., Дериченко А.В., Боженкова А.С., Маркин В.С., Азаров В.Н. Влияние транспортных магистралей на формирование шума в городской среде и способы его снижения // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257.

9. Sulaiman F.S., Darus N., Mashros N., Haron Z., Yahya K. Traffic Noise Assessment at Residential Areas in Skudai, Johor. International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON 2017). E3S Web Conf. 2018. Volume 34. P. 02024. URL: e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/09/e3sconf\_cenviron2018\_02024/e3sconf\_cenviron2018\_02024.html.

10. Sówka I., Kobus D., Chlebowska Styś A., Zathey M. Characteristics of selected elements of the air quality management system in urban areas in Poland. International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17). E3S Web Conf. 2017. Volume 22. P. 00165. URL: e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2017/10/e3sconf\_asee2017\_00165/e3sconf\_asee2017\_00165.html.

11. Иванова Ю. П., Надер Б. Ю., Мишаков В.А., Шаповалова Ю.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6263.

---

## References

1. Doncova T. V. Balansovyj metod ocenki zagryazneniya vozduшной среды крупных городов na principah biosfernoj sovместимости [Balance method for detecting aircraft of large cities at biospheric security sites]: dis. k–ta tekhn. nauk. Volgograd, 2016. 161 p.
2. Kuzmichev A. A. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya gorodского атмосферного аерозоля i parametrov vozduшной среды na zagryaznenie zdaniy i sooruzhenij [Theoretical and experimental studies of the influence of urban atmospheric aerosol and air parameters on pollution of buildings and structures]: dis. kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2019. 179 p.
3. Ionisyan A. S. Problemy fiziko-matematicheskikh nauk: materialy 48-j nauch.-metod. konf. преподавателей i studentov "Universitetskaya nauka - regionu". Stavropol': Izd-vo SGU, 2003. 76-78 p.
4. Prognoz pogody [Weather forecast]. URL: [gismeteo.ru](http://gismeteo.ru).
5. Kremer N. SH. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moskva: YUNITI-DANA, 2002. 543 p.
6. Borovikov A. V. STATISTICA. Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere [The art of data analysis on a computer]. Sankt-Peterburg: Izd. dom «Piter», 2001. 656 p.
7. Ivanova YU. P., Sokolova E. V., Saharova A.A., Ivanova O.O., Azarov V.N. Vestnik Volgogradского государственного архитектурно-строительного университета. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2020. № 3(80). 134-141 p.
8. Ivanova YU.P., Solov'eva T.V., Derichenko A.V., Bozhenkova A.C., Markin V.S., Azarov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257).
9. Sulaiman F.S., Darus N., Mashros N., Haron Z., Yahya K. Traffic Noise Assessment at Residential Areas in Skudai, Johor. E3S Web Conf. Volume 34,



2018 International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON 2017). P. 02024. URL: [e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/09/e3sconf\\_cenviron2018\\_02024/e3sconf\\_cenviron2018\\_02024.html](https://e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/09/e3sconf_cenviron2018_02024/e3sconf_cenviron2018_02024.html).

10. Sówka I., Kobus D., Chlebowska Styś A., Zathay M. Characteristics of selected elements of the air quality management system in urban areas in Poland. E3S Web Conf. Volume 22, 2017. International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17). P. 00165. URL: [e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2017/10/e3sconf\\_asee2017\\_00165/e3sconf\\_asee2017\\_00165.html](https://e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2017/10/e3sconf_asee2017_00165/e3sconf_asee2017_00165.html).

11. Ivanova YU. P., Nader B. YU., Mishakov V.A., SHapovalova YU.A., Ivanova O.O., Azarov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6263](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6263).