

УДК 629.7.073.7

DOI 10.51955/2312-1327\_2023\_3\_22

## ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПИСАНИЕ ПОРЫВОВ ВЕТРА В ЗОНЕ ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ, ВЛИЯЮЩИХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

*Елена Игоревна Трусова<sup>1,2</sup>  
orcid.org/0009-0006-3990-261X,  
ведущий специалист<sup>1</sup>  
аспирант<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Публичное акционерное общество  
«Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК»)*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический  
университет гражданской авиации,  
Кронштадтский б-р, д. 20  
Москва, 125493, Россия  
elenatru2011@yandex.ru*

*Виталий Дмитриевич Рубцов,  
orcid.org/0009-0007-4798-9150,  
доктор технических наук, профессор  
Почетный работник науки и техники РФ,  
главный научный сотрудник  
Государственный научно-исследовательский  
институт гражданской авиации,  
Михалковская ул., д. 67, корп. 1  
Москва, 125438, Россия  
vostburtiv@gmail.com*

*Александра Леонидовна Рыбалкина,  
orcid.org/0009-0009-4063-6525,  
кандидат технических наук, доцент  
Московский государственный технический  
университет гражданской авиации,  
Кронштадтский б-р, д. 20  
Москва, 125493, Россия  
rybalkina@list.ru*

**Аннотация.** Описано влияние порывов ветра на безопасность полётов воздушных судов. Обоснован импульсный характер порывов ветра. Проанализированы экспериментальные исследования порывов ветра, проведенные при помощи параметрического регистрирующего устройства на ультразвуковом луче и анемометра, и показано, что порывы ветра имеют импульсный характер, аналогично выбросам огибающей атмосферного шума. Известные из литературы результаты аналитического описания вероятностных характеристик выбросов огибающей атмосферного шума применены к порывам ветра на взлётно-посадочной полосе (ВПП). Приведены характеристики для средней длительности порывов ветра, интервалов между порывами ветра и средней длительности интервалов, распределения длительности порывов ветра, среднего числа и распределения максимумов значений порывов ветра.

**Ключевые слова:** порывы ветра, вероятностное описание, безопасность полётов, воздушное судно, логарифмически нормальная модель.

# PROBABILISTIC DESCRIPTION OF WIND GUSTS IN THE RUNWAY AREA AFFECTING THE SAFETY OF AIRCRAFT FLIGHTS

*Elena I. Trusova<sup>1,2</sup>*  
*orcid.org/0009-0006-3990-261X*  
*lead specialist<sup>1</sup>*  
*graduate student<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Public Joint Stock Company SC "United Aircraft Corporation" (PJSC "UAC")*  
<sup>2</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation,*  
*20, Kronshtadtsky blvd*  
*Moscow, 125493, Russia*  
*elenatru2011@yandex.ru*

*Vitalii D. Rubtsov,*  
*orcid.org/0009-0007-4798-9150,*  
*Doctor of Technical Sciences, Professor*  
*Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation*  
*Chief Scientific Officer*  
*The State Scientific Research Institute of Civil Aviation,*  
*67 k.1, Mihalkovskay street*  
*Moscow, 125438, Russia*  
*vostburtiv@gmail.com*

*Alexandra L. Rybalkina,*  
*orcid.org/0009-0009-4063-6525,*  
*Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor*  
*Moscow State Technical University of Civil Aviation,*  
*20, Kronshtadtsky blvd*  
*Moscow, 125493 Russia*  
*rybalkina@list.ru*

**Abstract.** The influence of wind gusts on the safety of aircraft flights is described. The impulse nature of wind gusts is substantiated. Experimental studies of wind gusts carried out with the help of a parametric recording device on an ultrasonic beam and an anemometer are analyzed, and it is shown that wind gusts have an impulsive nature, similar to atmospheric noise envelope emissions. The results of the analytical description of the probabilistic characteristics of atmospheric noise envelope emissions known from the literature are applied to wind gusts on the runway. Characteristics are given for the average duration of wind gusts, intervals between wind gusts and the average duration of intervals, the distribution of the duration of wind gusts, the average number and distribution of maxima of wind gusts.

**Keywords:** gusts of wind, probabilistic description, flight safety, aircraft, logarithmically normal model.

## Введение

Порывы ветра, проявляющиеся в резком изменении его скорости, на малой высоте являются опасными и трудно прогнозируемыми погодными явлениями для авиации [Богаткин, 1986; Основы..., б.г.]. Попадание воздушного судна (ВС) в порыв ветра сопровождается неожиданным для пилота изменением параметров движения вследствие изменения скорости воздушного потока [Баранов и др., 1981; Особые ситуации..., 2009], так как поведение ВС зависит от множества факторов, в том числе, от режима и скорости полёта, полётной конфигурации, лётно-технических характеристик, а также правильности и быстроты действий

пилота [Гузий, 2009; Мануйлов, 2021]. При постепенно изменяющихся скорости и направлении ветра проблем с пилотированием обычно не возникает, однако даже опытные пилоты могут оказаться не в состоянии справиться с управлением при нахождении воздушного судна на небольшой высоте, когда скорость или направление ветра изменяются быстрее [Афанасьева и др., 2017; Воробьев и др., 1991], чем возможно изменение скорости полёта [Ахрамеев и др., 2020; Васин, 1980; Щукин и др., 2016].

### Метод математического описания порывов ветра

Порывы ветра имеют импульсный характер, как следует из приведенных [Рубцов и др., 2015] экспериментальных данных. Аналогичный характер имеют выбросы огибающей атмосферного шума, для описания которых получены характеристики [Рубцов, 1977].

Данные сравнительного анализа экспериментальных исследований порывов ветра с помощью параметрического регистрирующего устройства на ультразвуковом луче и данных анемометра показаны на рисунке 1. Увеличение скорости ветра на 3-8 м/с в таблице 1 отражено знаком «+», уменьшение на ту же величину – знаком «-».

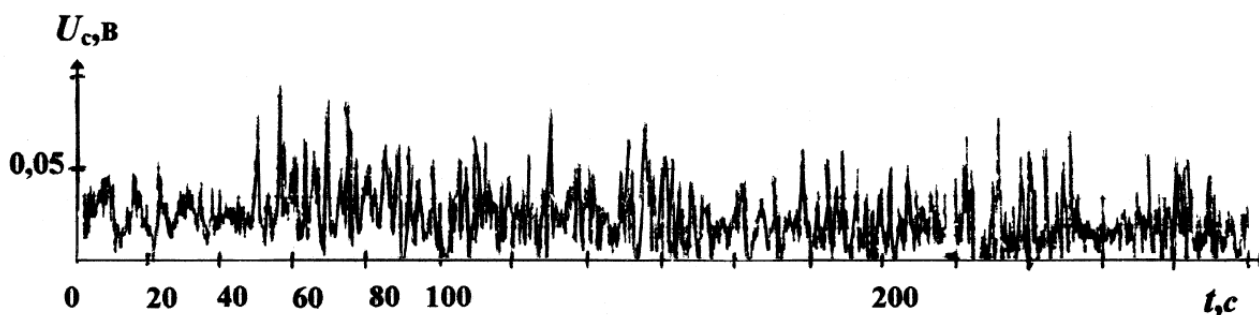


Рисунок 1 – Порывы ветра, зарегистрированные параметрическим регистрирующим устройством на ультразвуковом луче, *Источник:* <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-parametricheskikh-ustroystv-registratsii-na-opticheskom-i-ultrazvukovom-zondiruyuschih-luchah/viewer>

Таблица 1 – Сравнения результатов регистрации порывов ветра с помощью анемометра и регистрирующего устройства на ультразвуковом луче [Рубцов и др., 2015]

Анемометр	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-
Регистрирующее устройство	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+
Анемометр	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+
Регистрирующее устройство	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+

Из рисунка 1 и таблицы 1 следует, что ветровые возмущения имеют импульсный характер. Поэтому для описания ветровых возмущений может быть

использован математический аппарат атмосферного шума, также имеющий импульсный характер.

В статье [Рубцов, 1977] приведено аналитическое описание статистических характеристик выбросов огибающей атмосферного шума и показано, что логарифмически нормальная модель атмосферного шума обеспечивает качественное совпадение экспериментальных и расчетных данных, причем особенно хорошее совпадение имеет место при высоком пороговом уровне. Так как ветровые возмущения будут иметь импульсный характер, применим полученные результаты к порывам ветра на ВПП.

## Результаты

**Средняя длительность порыва ветра, интервал между порывами ветра и средняя длительность интервала**

Пересечение огибающей порывов ветра находится по формуле:

$$\lambda(E_0) = \frac{1}{2\pi\sigma} \left(-\frac{B_E''(0)}{B_E(0)}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha^2(E_0)\right), \quad (1)$$

где:

$B_E(0)$  – нулевое значение корреляционной функции огибающей,

$B_E''(0)$  – вторая производная корреляционной функции в нуле,

$E_0$  – заданный уровень ветра.

$$\alpha(E_0) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{E_0}{A} = \sigma + \frac{1}{\sigma} \ln \frac{E_0}{B_E^{1/2}(0)}, \quad (2)$$

Параметр  $\sigma$  характеризует степень «импульсности» шума и связан с легкоопределяемым параметром  $V_d$ , представляющим собой выраженную в децибелах разность среднеквадратического и среднего значения процесса [Левин, 1966].

$$V_d = 20 \lg \left[ \frac{(\overline{E^2})^{\frac{1}{2}}}{\overline{E}} \right] = 10\sigma^2 \lg e \approx 4,35\sigma^2 \quad (3)$$

При вычислениях по формуле (2) приблизительно может быть описано выражением:

$$\omega_{1E} = \left(-\frac{B_E''(0)}{B_E(0)}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 2\pi \Delta f / \sqrt{\sigma}, \quad (4)$$

где  $\Delta f$  – входная полоса приемника,

остальные обозначения – прежние.

Логарифмически нормальная модель атмосферного шума обеспечивает качественное совпадение экспериментальных и расчётных данных, причем особенно хорошее совпадение имеет место при высоком пороговом уровне.

Средняя длительность порыва ветра  $E(t)$  будет равна:

$$m_1\{\xi_B\} = 2\pi\sigma \left(-\frac{B_E(0)}{B_E''(0)}\right)^{\frac{1}{2}} \times F[-\alpha(E_0)] \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(E_0)\right], \quad (5)$$

где  $F$  – интегральная функция распределения нормального процесса.

Интервал между порывами ветра:

$$m_1\{\xi_{и}\} = 2\pi\sigma\left(-\frac{B_E(0)}{B_E''(0)}\right)^{1/2} \times F[\alpha(E_0)]\exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(E_0)\right]. \quad (6)$$

Средняя длительность интервала:

$$m_1\{\xi\} = 2\pi\sigma\left(-\frac{B_E(0)}{B_E''(0)}\right)^{1/2} \exp\left[\frac{1}{2}\alpha^2(E_0)\right]. \quad (7)$$

### Распределение длительности порывов ветра

При помощи метода «опорных импульсов» аппроксимацию распределения длительности порывов ветра удаётся полностью выразить через элементарные и табулированные функции лишь для односвязной импульсной последовательности.

Распределение длительности порывов ветра представлено в формулах (8) и (9) в дискретном виде.

$$P\{\xi_B = k\tau_0\} = p_{+-}p_{++}^{k-1}, \quad k=1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$P\{\xi_{и} = k\tau_0\} = p_{-+}p_{--}^{k-1}, \quad (9)$$

где  $p_{++} = 1 - p_{+-}$ ;  $p_{-+} = 1 - p_{--}$ ,

$k$  – текущее значение в дискретном виде,

$\tau_0$  – длительность дискрета времени,

$p_{++} = K[R_0, \alpha(E_0)]/F[-\alpha(E_0)]$  – вероятность того, что опорный импульс длительностью  $\tau_0$  выше  $E_0$ , в то время как предыдущий импульс ниже указанного уровня;

$K(x, y)$  – двумерная функция распределения нормального процесса [Мельник, 2015].

$F(x)$  – интегральная функция распределения нормального процесса,

$p_{+} = F[-\alpha(E_0)]$  – безусловная вероятность превышения уровня  $E_0$ ,

$p_{--} = \frac{1}{1-p_{+}}(1 - 2p_{+} + p_{+}p_{++})$  – вероятность, имеющая смысл, аналогичный  $p_{++}$ , только для непревышений уровня  $E_0$ ,

$p_{-} = 1 - p_{+}$ , остальные обозначения – прежние.

### Среднее число и распределение максимумов значений порывов ветра

Среднее число максимумов, превышающих уровень ветра  $E_0$ :

$$\mu_{\text{макс}}(E_0) = \frac{1}{2\pi\sigma} \left(-\frac{B_E''(0)}{B_E(0)}\right)^{1/2} \left\{ nF\left(-\frac{n\alpha(E_0)}{(n^2-1)^{1/2}}\right) + \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(E_0)\right] F\left(\frac{\alpha(E_0)}{(n^2-1)^{1/2}}\right) \right\},$$

$$n = \sigma \left[ \frac{B_E(0)B_E^{IV}(0)}{[B_E''(0)]^2} - 3 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

где  $B_E^{IV}$  – четвёртая производная корреляционной функции в нуле, остальные обозначения – прежние.

Среднее число максимумов порывов ветра любой величины:

$$\mu_{\text{макс}} = \frac{k}{2\pi\sigma} \left(-\frac{B_E''(0)}{B_E(0)}\right)^{1/2}. \quad (11)$$

При высоком уровне ветра  $E_0$

( $\ln[E_0/V_E^{1/2}(0)] \gg 1$ ) из (10) и (1) следует асимптотическая формула:

$$\mu_{\text{макс}}(E_0) \simeq \lambda(E_0). \quad (12)$$

Плотность вероятности максимумов порывов ветра:

$$W_{1 \text{ макс}}(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma E} \left\{ \frac{(n^2-1)^{1/2}}{n} \exp\left(-\frac{n^2\alpha^2(E)}{2(n^2-1)}\right) + \frac{\sqrt{2\pi}}{n} \alpha(E) \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(E)\right] F\left(\frac{\alpha(E)}{(n^2-1)^{1/2}}\right) \right\} \quad (13)$$

где  $E$  – текущее значение процесса флуктуации ветровых возмущений.

Интегральная функция распределения порывов ветра:

$$F_{1 \text{ макс}}(E) = F\left(\frac{n\alpha(E)}{(n^2-1)^{1/2}}\right) - \frac{1}{n} F\left(\frac{\alpha(E)}{(n^2-1)^{1/2}}\right). \quad (14)$$

При  $n \gg 1$  и  $n \rightarrow 1$  из (13) и (14) получаем асимптотические формулы:

$$W_{1 \text{ макс}}(E) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma E} \exp\left(-\frac{\alpha^2(E)}{2}\right) = W_1(E), \quad n \gg 1; \quad (15)$$

$$F_{1 \text{ макс}}(E) \simeq F[\alpha(E)], \quad n \gg 1; \quad (16)$$

$$W_{1 \text{ макс}}(E) \simeq \frac{\alpha(E)}{\sigma E} \exp\left(-\frac{\alpha^2(E)}{2}\right), \quad n \rightarrow 1, \quad \alpha(E) \geq 0; \quad (17)$$

$$F_{1 \text{ макс}}(E) \simeq 1 - \exp\left(-\frac{\alpha^2(E)}{2}\right), \quad n \rightarrow 1, \quad \alpha(E) \geq 0. \quad (18)$$

### Заключение

Логарифмически нормальная модель порывов ветра позволяет дать практически полное вероятностное описание порывов ветра на ВПП. В рамках этой модели для вычисления характеристик выбросов порывов ветра на ВПП достаточно знания параметра  $V_d$ , характеризующего степень «импульсности» порыва, и корреляционной функции порывов ветра  $V_E(\tau)$ .

Зная распределение порывов ветра и интервалов между ними, можно сопоставить их с психофизиологическими возможностями пилота, чтобы понять, успеет ли пилот отреагировать на порыв ветра и скомпенсировать управление воздушным судном.

### Библиографический список

- Афанасьева Ю. С.* Оценка метеорологических рисков в гражданской авиации / Ю. С. Афанасьева, О. Г. Богаткин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 1(14). С. 5-13. EDN YJTXKT.
- Ахрамеев В. И.* Сдвиг ветра – угроза безопасности полетов / В. И. Ахрамеев, А. Г. Костылев, Д. В. Плаксин // Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов. 2020. №14. С. 206-212. EDN FJMLLT.
- Баранов А. М.* Авиационная метеорология / А. М. Баранов, С. В. Солонин. СПб.: Гидрометеиздат, 1981. 304 с.
- Богаткин О. Г.* Графический способ прогноза болтанки самолетов // Труды ЛГМИ. 1986. Вып. 34. С. 84-87.

- Васин И. Ф. Влияние сдвига ветра на безопасность полетов воздушных судов // Итоги науки и техники. Серия Воздушный транспорт. 1980. Том. 8. С. 5-30.
- Воробьев В. И. Синоптическая метеорология / В. И. Воробьев, А. П. Князев. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 581 с.
- Гузий А. Г. Системный подход к управлению безопасностью полетов // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 8. С. 9-15. EDN NCLUFN.
- Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1966. 728 с. EDN UYYXZD.
- Мануйлов С. А. Обеспечение безопасности полетов при воздействиях неблагоприятных метеорологических условий на воздушное судно // Проблемы безопасности полетов. 2021. №10. С. 21-44. DOI 10.36535/0235-5000-2021-10-4. EDN MZTKJI.
- Мельник Д. М. Система управления качеством, и система управления безопасностью полетов в производственной деятельности эксплуатантов гражданской авиации РФ // Управление риском. 2015. № 3(75). С. 33-40. EDN UYVUBX.
- Основы гидрометеорологии // [Электронный ресурс]. URL: <http://okafish.ru/uchebnik/glava10.htm> (дата обращения: 25.05.2023).
- Особые ситуации в лётной практике / А. В. Чунтул, В. И. Дудин, О. А. Косолапов, М. А. Ерусалимский. М.: МОО «Ассоциация журналистов, пишущих на правоохранительную тематику», 2009. 240 с.
- Рубцов В. Д. Выбросы огибающей атмосферного шума // Радиотехника и электроника. 1977. Т. XXII, № 1. С. 64-71.
- Рубцов В. Д. Экспериментальные исследования параметрических устройств регистрации на оптическом и ультразвуковом зондирующих лучах волновых возмущений в воздушной и водной средах / В. Д. Рубцов, С. А. Дубянский // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 213(3). С. 129-134. EDN TONSAF.
- Щукин Г. Г. Радиолокационный мониторинг опасных метеорологических явлений / Г. Г. Щукин, В. В. Булкин, Р. В. Первушин. М.: Издательство «Перо», 2016. 98 с. EDN YKZSTJ.

## References

- Afanasieva Y. S., Bogatkin O. G. (2017). Assessment of meteorological risks in civil aviation. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 1(14): 5-13. (in Russian)
- Akhrameev V. I., Kostylev A. G., Plaksin D. V. (2020). Wind shear - a threat to flight safety. *Flight Operations and Flight Safety Issues*. 14: 206-212. (in Russian)
- Baranov A. M., Solonin C. V. (1981). *Aviation meteorology*. Saint Petersburg: Izd. Gidrometeoizdat, 1981. 304 p. (in Russian)
- Bogatkin O. G. (1986). Graphical method for forecasting aircraft chatter. *Proceedings of the LGMI*. 34: 84-87. (in Russian)
- Chuntul A. V., Dudin V. I., Kosolapov O. A., Erusalimskii M. A. (2009). Special situations in flight practice. Moscow: Assotsiatsiya zhurnalistov, pishushchikh na pravookhranitel'nyuyu tematiku, 2009. 240 p. (in Russian)
- Fundamentals of hydrometeorology. Available at: <http://okafish.ru/uchebnik/glava10.htm> (accessed 25 May 2023). (in Russian)
- Guziy A. G. (2009). A systematic approach to flight safety management. *Flight safety issues*. 8: 9-15. (in Russian)
- Levin B. R. (1966). *Theoretical foundations of statistical Radio Engineering*. Moscow: Soviet radio, 1966. 728 p. (in Russian)
- Manuilov S. A. (2021). Ensuring flight safety under the influence of unfavorable meteorological conditions on an aircraft. *Flight safety issues*. 10: 21-44. (in Russian)

- Melnik D. M.* (2015). Quality management system and flight safety management system in the production activities of civil aviation operators of the Russian Federation. *Risk Management*. 3(75): 33-40. (in Russian)
- Rubtsov V. D.* (1977). Atmospheric noise envelope emissions. *Radio engineering and electronics*. XXII. 1: 64-71. (in Russian)
- Rubtsov V. D., Dobyansky S. A.* (2015). Experimental studies of parametric devices for recording wave disturbances in air and water media on optical and ultrasonic probing beams. *Scientific Bulletin of the MSTU CA*. 213: 129-134. (in Russian)
- Shchukin G. G., Bulkin V. V., Pervushin R. V.* (2016). Radar monitoring of dangerous meteorological phenomena. Moscow: Izd. «Feather», 2016. 98 p. (in Russian)
- Vasin I. F.* (1980). The effect of wind shear on aircraft flight safety. *Results of science and technology. Air Transport series*. 8: 5-30. (in Russian)
- Vorobyov V. I., Knyazev A. P.* (1991). Synoptic meteorology. Leningrad: Izd. *Gidrometeoizdat*, 1991. 581 p. (in Russian)