

УДК 629.7.015.4

Т. С. БОЙКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПОРЫВОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА САМОЛЕТ В ТИПОВОМ ПОЛЕТЕ**

*Разработана методика расчета интегральной повторяемости порывов на этапе проектирования самолета с учетом предполагаемых условий его эксплуатации. Выполнено сопоставление расчетных кривых, полученных по непрерывной и дискретной моделям турбулентности, с результатами летных измерений. Показано, что обе модели турбулентности хорошо согласуются между собой и с данными летных измерений в зоне малых скоростей порывов, определяющей ресурс конструкции. Однако в области экстремальных порывов достаточной точностью обладает лишь модель непрерывной турбулентности. Проведен анализ интегральной повторяемости порывов на малых высотах. Для дискретной схемы турбулентности отмечена целесообразность использования дополнительной кривой на высотах 0 – 0,9 км. Приведены результаты расчета кривых интегральной повторяемости порывов за полет самолетов различного типа, показана погрешность использования осредненных кривых по данным летных измерений.*

**Ключевые слова:** *нагрузки, порыв, турбулентность, повторяемость, типовой полет.*

**Введение**

Одной из основных задач современных научно-исследовательских работ в области авиастроения является улучшение прочностных и ресурсных характеристик конструкции одновременно с уменьшением массы самолета. Для достижения поставленной цели разрабатывают новые материалы [1, 2], технологии изготовления и сборки элементов, методы контроля технического состояния изделия [3]. Однако на этапе проектирования большое влияние на массовое совершенство самолета оказывают применяемые методы расчета действующих нагрузок, прочности и долговечности конструкции.

Многолетний опыт создания самолетов показал, что учет только расчетных статических нагрузок позволяет спроектировать самолет с довольно низким ресурсом – до 18 тыс. полетов [4]. Для увеличения ресурса необходимо при проектировании учитывать нагрузки, действующие на самолет при полете в турбулентной атмосфере.

Методы расчета нагрузок на самолет в полете начали развиваться в середине XX века, когда были сформированы математические модели турбулентной атмосферы [5, 6] и появились результаты измерений перегрузок в центре тяжести самолетов, вызванных действием воздушных порывов [7]. Однако в современной практике проектирования авиационных конструкций нет четко сформулированной отраслевой методики расчета нагрузок на самолет в полете. Существующие методики постоянно претерпевают изменения. Так, например, в работе [8]

автор предлагает внести дополнения в действующий отраслевой стандарт «Модель турбулентности атмосферы» [9] в связи с полученными результатами статистической обработки большого количества данных летных измерений перегрузок в центре тяжести отечественных самолетов транспортной категории. Также подвергаются критике методы расчета нагрузок на самолет в обобщенном типовом полете. Авторы работ [10, 11] отмечают, что расчет действующих нагрузок и вносимого усталостного повреждения в каждом полете конкретного самолета приводит к существенному уточнению израсходованного и остаточного ресурса воздушного судна.

*Целью данной работы* является разработка методики расчета интегральной повторяемости порывов, действующих на крыло самолета, с учетом параметров полета и модели непрерывной атмосферной турбулентности без привлечения дополнительных результатов летных измерений.

**Постановка задачи**

В горизонтальном полете на крыло самолета действуют аэродинамические и массово-инерционные силы. Разобьем весь полет на  $k$  режимов, для каждого из которых будут постоянны высота и скорость полета, а также масса самолета, топлива и грузов. Тогда нагрузку на крыло самолета можно представить в виде суммы некоторого среднего уровня при единичной перегрузке и приращения, вызванного действием случайного воздушного порыва.

Для оценки накапливаемого в полете усталостного повреждения конструкции необходимо знать интегральную повторяемость воздушных порывов, действующих на крыло самолета. В работах [7, 8] на основании данных летных измерений показано, что для различных типов самолетов интегральные повторяемости воздушных порывов за полет существенно отличаются между собой. В работе [10] авторы указывают на то, что даже один самолет, выполняя различные задания, получает разное усталостное повреждение конструкции вследствие неодинаковых нагрузок в полете.

На этапе проектирования самолета данные летных измерений нагрузок отсутствуют. Параметры атмосферной турбулентности регламентированы отраслевым стандартом [9] в виде дискретной и непрерывной моделей турбулентности. Дискретная модель задана кривыми интегральной повторяемости порывов на разных высотах. Непрерывная модель турбулентности описывает относительную повторяемость вертикальной скорости  $W$  порывов воздуха формулой

$$\frac{N(W)}{N_0(W)} = P_1 \cdot e^{-\frac{W}{b_1}} + P_2 \cdot e^{-\frac{W}{b_2}}, \quad (1)$$

где  $P_1, P_2$  – вероятности полета в зоне умеренной и интенсивной турбулентности,

$b_1, b_2$  – коэффициенты, характеризующие умеренную и интенсивную турбулентности,

$N(W)$  – число превышений в единицу времени кривой  $W$  заданного уровня,

$N_0(W)$  – число превышений в единицу времени кривой  $W$  уровня  $W=0$ :

$$N_0(W) = \frac{V_{ЛА}}{2\pi} \left( \frac{\int_{\Omega_{\min}}^{\Omega_{\max}} \Omega^2 \cdot \Phi_W(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega_{\min}}^{\Omega_{\max}} \Phi_W(\Omega) d\Omega} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $V_{ЛА}$  – средняя скорость ЛА,

$\Omega$  – пространственная частота,

$\Omega_{\min}, \Omega_{\max}$  – пределы интегрирования, согласно [9],

$\Phi_W(\Omega)$  – спектральная плотность энергии вертикальной скорости воздушных порывов, задана формулой Кармана

$$\Phi_W(\Omega) = \frac{L_W \cdot \sigma_W^2}{\pi} \cdot \frac{1 + \frac{8}{3}(1,339 \cdot L_W \cdot \Omega)^2}{\left[1 + (1,339 \cdot L_W \cdot \Omega)^2\right]^{\frac{11}{6}}}, \quad (3)$$

где  $L_W$  – интегральный масштаб турбулентности в вертикальном направлении,

$\sigma_W$  – интенсивность вертикальной скорости воздушных порывов.

Используя формулу (1), получим  $N(W)_j$  – число превышений в единицу времени кривой  $W$  заданного уровня на  $j$ -м режиме полета самолета. Чтобы получить данные, приведенные к одному километру, необходимо разделить  $N(W)_j$  на среднюю истинную скорость  $V_{ЛА j}$  на рассматриваемом режиме полета.

Представляет интерес сопоставление параметров интегральной повторяемости порывов по различным расчетным моделям. На рис. 1 приведены кривые интегральной повторяемости порывов на разных высотах, полученные по дискретной и непрерывной моделям турбулентности, а также повторяемость порывов, измеренная при эксплуатации гражданских самолетов [7]. С целью сопоставления повторяемость порывов по непрерывной схеме турбулентности вычислена для тех высот, на которых получены экспериментальные данные Дж. Тейлора. Дискретная схема турбулентности позволяет выполнить вычисления только в некотором интервале высот.

Непрерывная и дискретная модели турбулентности удовлетворительно согласуются между собой в области малых скоростей порывов. Однако непрерывная модель турбулентности дает результаты, близкие к данным летных измерений, а дискретная схема приводит к несколько заниженным значениям повторяемости порывов, действующих на самолет в полете. Оценку вероятных экстремальных значений нагрузок при больших скоростях порывов можно выполнять лишь по непрерывной схеме атмосферной турбулентности.

Ранее было показано [12], что максимальное усталостное повреждение конструкция крыла самолета получает на этапе набора высоты и снижения, на малых высотах. Дискретная модель задает осредненные параметры турбулентности на высотах от 0 до 3 км. Модель непрерывной атмосферной турбулентности позволяет вычислить интегральную повторяемость порывов на любой заданной высоте, начиная от 0 км.

В техническом отчете [13] установлено, что при анализе усталостного повреждения самолета в

полете на малых высотах использование модели дискретной атмосферной турбулентности дает заниженную оценку нагруженности элементов конструкции крыла. Более точную величину нагрузок получили путем дополнения данных отраслевого стандарта [9] кривой интегральной повторяемости порывов на высоте от 0 до 0,9 км, полученную по результатам летных измерений. На рис. 2 показано сопоставление кривых интегральной повторяемости скоростей воздушных порывов в диапазоне высот от 0 до 3 км по непрерывной и дискретной моделям атмосферной турбулентности.

Как видно из рис. 2 параметры интегральной повторяемости порывов по непрерывной схеме существенно различны между собой в зависимости от высоты полета. На границах рассматриваемого диапазона высот 0...3 км отличие может достигать до 100 раз. Дискретная схема этого не учитывает. Экспериментальные данные [7] хорошо согласуются с непрерывной моделью турбулентности, особенно в диапазоне малых скоростей порывов, определяющих ресурс конструкции. Дискретная модель турбулентности удовлетворительно согласуется с данными [8] в зоне малых скоростей порывов.

## Результаты

Кривые интегральной повторяемости порывов по дискретной схеме с достаточной точностью можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью:

$$N(W)_j = N_{0j} \cdot e^{-\frac{W}{C_{Wj}}}, \quad (4)$$

где  $N_{0j}$ ,  $C_{Wj}$  – параметры аппроксимации на различных высотах.

Угол наклона кривых характеризуется коэффициентом  $C_W$ , величина которого близка к 1 для всех рассматриваемых высот. А число превышений скоростей воздушных порывов  $N_0$  нулевого уровня задано дискретно для различных диапазонов высот. На рис. 3 показано сопоставление параметра  $N_0$ , полученного по дискретной и непрерывной моделям турбулентности атмосферы.

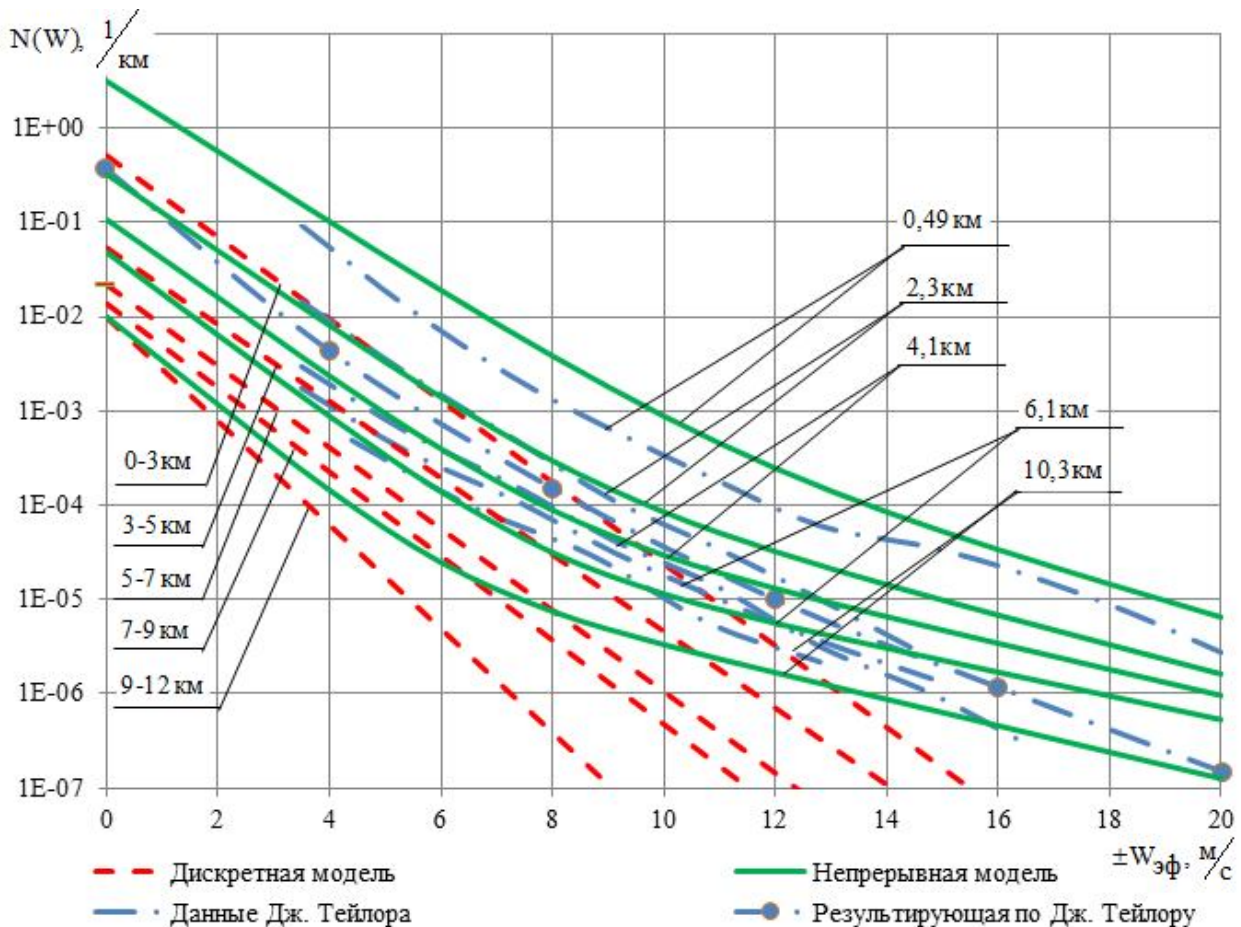


Рис. 1. Кривые интегральной повторяемости эффективных скоростей порывов за один километр пролетаемой дистанции на различных высотах

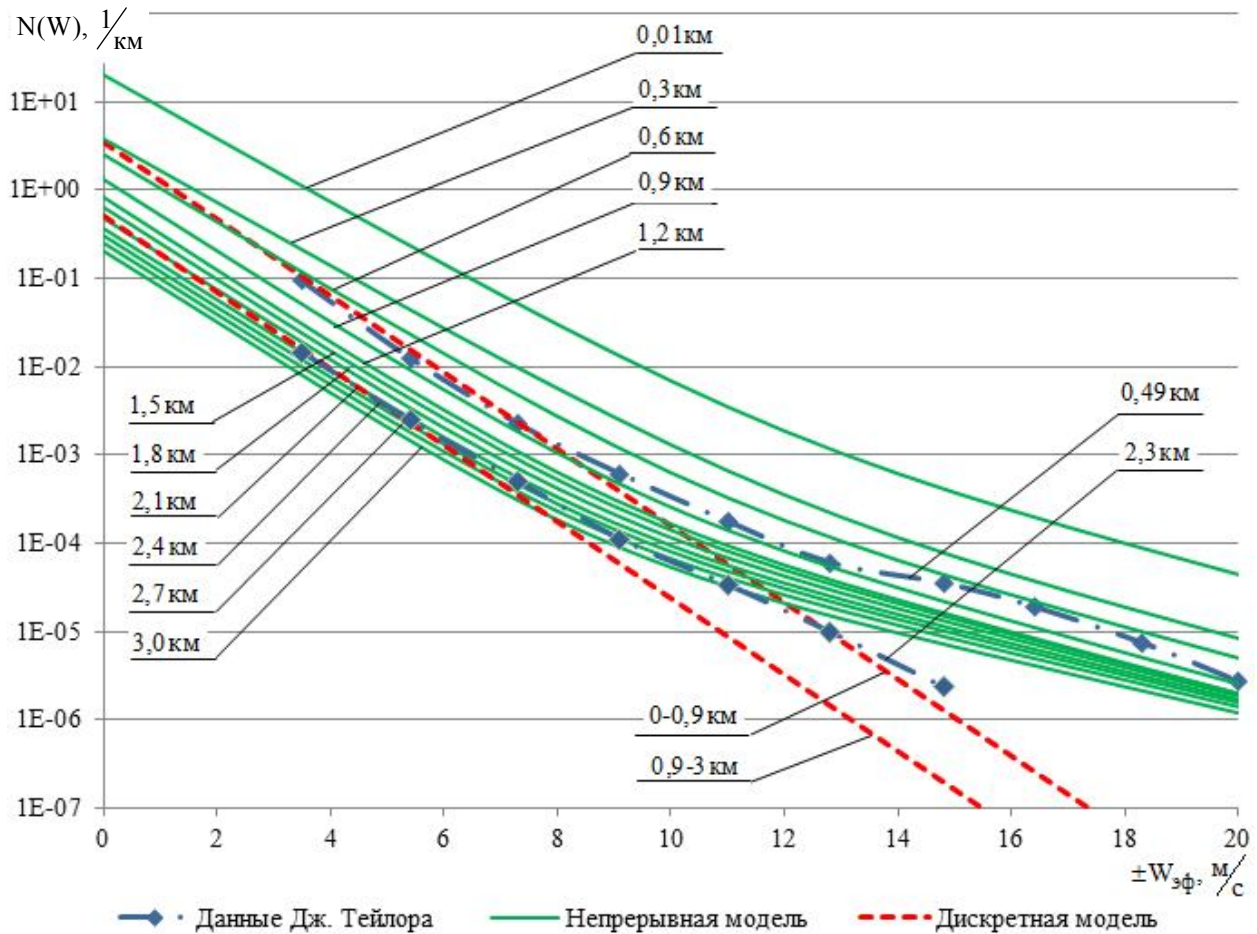


Рис. 2. Кривые интегральной повторяемости эффективных скоростей порывов за один километр пути на высотах от 0 до 3 км

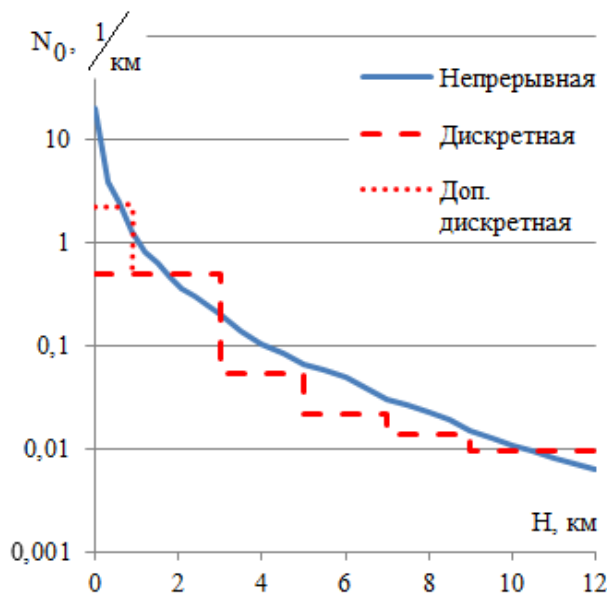


Рис. 3. Зависимость параметра  $N_0$  от рассматриваемой высоты полета

Данные кривые лежат в одной совокупности и не противоречат друг другу. Учет дополнительной

дискретной кривой интегральной повторяемости порывов на высотах 0 – 0,9 км существенно улучшает согласование между дискретной и непрерывной моделями атмосферной турбулентности.

Как уже отмечалось выше, для повышения точности расчета накопленного усталостного повреждения и оценки остаточного ресурса конструкции необходимо знать интегральные характеристики турбулентности в зависимости от параметров конкретного полета рассматриваемого самолета.

Интегральную повторяемость порывов на 1 км полета следует находить по формуле:

$$N(W) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^k N(W)_j \cdot \tau_j, \quad (5)$$

где  $L$  - дистанция, пролетаемая самолетом за весь полет,

$\tau_j$  - длительность  $j$ -го режима полета.

На рис. 4 показаны интегральные повторяемости порывов воздуха, действующих на самолеты Ил-76Т, Ту-134 за типовой полет. Учитывая различную

длительность типовых полетов самолетов, данные кривые приведены к 1 км пролетаемой дистанции в полете. Непрерывными линиями изображены расчетные кривые, полученные с использованием непрерывной модели атмосферной турбулентности, пунктирными линиями – расчетные кривые, полученные по дискретной схеме турбулентности.

Кроме того, на рис. 4 нанесена результирующая кривая, вычисленная Дж. Тейлором по данным летных измерений повторяемости порывов при эксплуатации гражданских самолетов [7]. Точечным пунктиром показана осредненная кривая, полученная В. Королёвым в результате обработки данных летных измерений при полетах в слое высот 0 – 3 км [8]. В работе [8] рассмотрено 18 типов отечественных транспортных самолетов с суммарным налетом более  $2 \cdot 10^6$  часов.

### Выводы

В результате сопоставления расчетных и экспериментальных кривых на рис. 4 установлено, что на этапе проектирования самолета применение отраслевого стандарта [9] допустимо и не противоречит данным летных измерений. Схема непрерывной атмосферной турбулентности по сравнению с дискретной дает более точную оценку случайных на-

грузок, действующих на самолет в предполагаемом полете. Использование результирующих экспериментальных кривых приводит к погрешности в оценке случайных нагрузок, а в дальнейшем и ресурса конструкции, так как для каждого типа самолета и профиля полета кривые интегральной повторяемости порывов могут существенно отличаться.

Порывы на высотах до 3 км вносят основной вклад в общее количество случайных порывов, действующих на самолет за весь полет. Это еще раз подтверждает тот факт, что основное усталостное повреждение конструкция самолета получает на малых высотах. Поэтому ресурс самолета слабо зависит от длительности крейсерского полета, а прогнозирование ресурса более рационально делать по количеству взлетов-посадок.

Целесообразно параметр  $N_0$  вычислять по модели непрерывной атмосферной турбулентности и далее эту величину использовать в схеме дискретных порывов.

Предложенная методика расчета интегральной повторяемости воздушных порывов, действующих на самолет в типовом полете, достоверна и может быть использована для оценки приращений повреждающих силовых факторов в полете, долговечности и ресурса самолета с учетом параметров его эксплуатации.

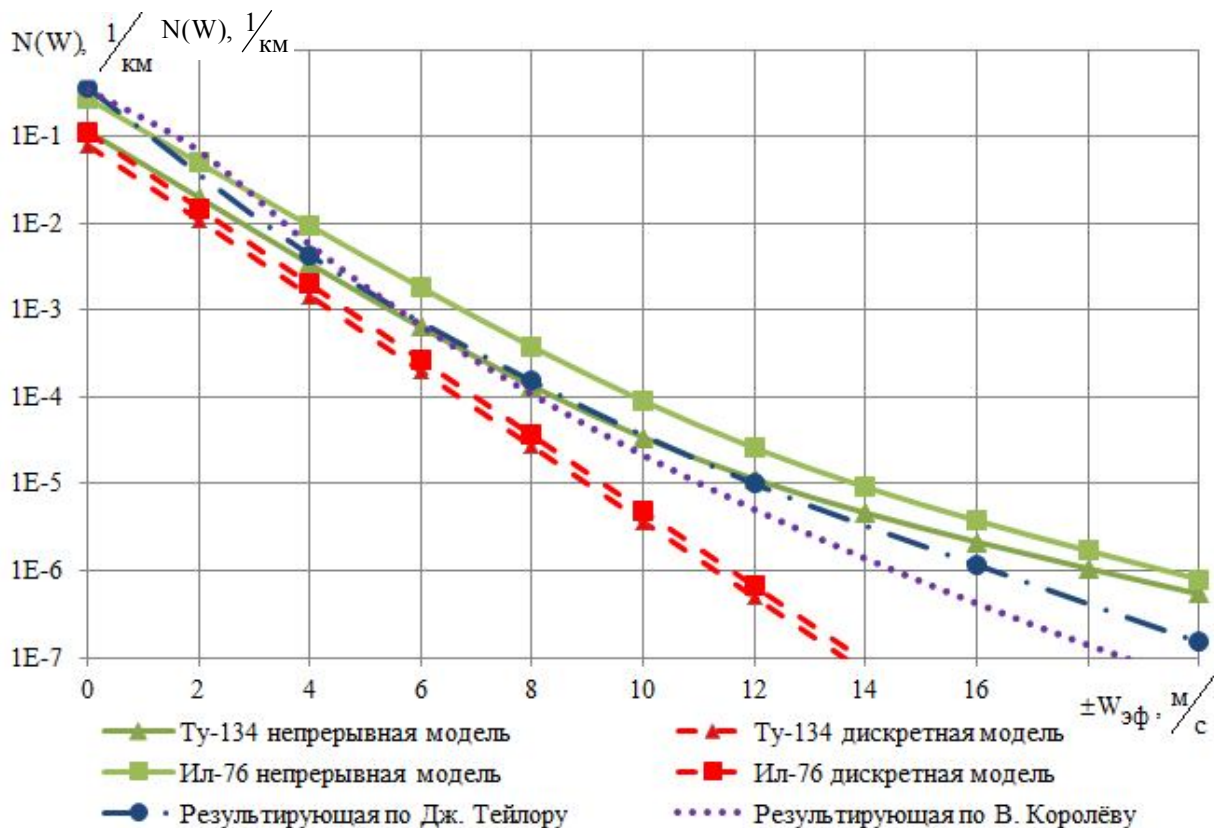


Рис. 4. Кривые интегральной повторяемости порывов на 1 км пути в типовом полете самолета

## Литература

1. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции [Текст] / Ю. М. Фейгенбаум, С. В. Бутушин, Д. Г. Божевалов, Ю. С. Соколов // *Науч. вест. ГосНИИ ГА*. – М., 2015. – № 7 (318). – С. 24 – 37.

2. Gardiner, G. Structural health monitoring: NDT-integrated aerostructures enter service [Электронный ресурс] / G. Gardiner // *CompositesWorld*. – Available at: <http://www.compositesworld.com/articles/structural-health-monitoring-ndt-integrated-aerostructures-enter-service>. – 31.7.2015.

3. Зависимость ресурсных характеристик среднемагистральных пассажирских самолетов от веса конструкции планера [Текст] / В. С. Дубинский, М. Д. Зайцев, Е. И. Крючков, Г. И. Нестеренко, А. Ю. Уджуху, А. Н. Шаныгин // *Труды ЦАГИ*. – Вып. 2658. – М., 2002. – С. 207 – 214.

4. Dryden, H. L. Turbulence Investigations at the National Bureau of Standards [Text] / H. L. Dryden // *Proc. Vth Intern. Congress for Applied Mechanics*. – Cambridge, Mass., 1938. – P. 362.

5. Von Karman, Th. Sur la Theorie Statistique de la Turbulence. [Text] / Th. Von Karman // *Collected works of Theodore von Karman*. – 1948. – Vol. IV. – P. 357 – 359.

6. Тейлор, Дж. Нагрузки, действующие на самолет [Текст] : пер. с англ. / Дж. Тейлор. – М. : Машиностроение, 1971. – 371 с.

7. Королёв, В. С. Интегральная повторяемость вертикальных индикаторных порывов атмосферы, описываемая логарифмически нормальным законом вероятности [Текст] / В. С. Королёв // *Науч. вест. ГосНИИ ГА*. – М., 2015. – № 7 (318). – С. 45 – 53.

8. ОСТ 1 02514-84. Модель турбулентности атмосферы. – Введ. 01.01.1986. – 13 с.

9. Орлова, Т. И. Мониторинг нагрузок и накопленной усталостной повреждаемости в условиях эксплуатации: реализация, результаты и возможности [Текст] / Т. И. Орлова, В. В. Стрелков, В. И. Цымбалюк // *Извест. Самар. науч. центра Рос. акад. наук : материалы конф. «Системы управления авиационным предприятием»*, 16-17 октября 2014. – Самара : «РАКС - С», 2014. – Т. 16, № 1 (5). – С. 1512 – 1520.

10. Фейгенбаум, Ю. М. Анализ современного состояния и перспектив развития отечественной системы мониторинга эксплуатации силовой конструкции гражданских ВС [Текст] / Ю. М. Фейгенбаум, Ю. С. Соколов // *Науч. вест. ГосНИИ ГА*. – М., 2015. – № 7 (318). – С. 14 – 23.

11. Бойко, Т. С. Влияние параметров профиля типового полета на долговечность крыла неманевренного самолета [Текст] / Т. С. Бойко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 3 (59). – Х., 2009. – С. 7 – 17.

12. Расчет долговечности регулярных зон крыла самолета Бе-200ЧС : отчет о НИОКР (промежуточн.): Ч. 3 [Текст] / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» ; рук. Фомичев П. А. ; исполн. Бойко Т. С., Пинчук Д. А., Заруцкий А. В. и др. – Х., 2010. – 82с.

## References

1. Feigenbaum, Yu. M., Butushin, S. V., Bozhevalov, D. G., Sokolov, Yu. S. Kompozitsionnye materialy i istoriya ikh vnedreniya v aviatsionnye konstruksii [Composite materials and the history of their implementation in the aviation design]. *Nauchnyj vestnik GosNII GA – Scientific Bulletin of GosNII GA*, Moscow, 2015, no. 7 (318), pp. 24 – 37.

2. Gardiner, G. Structural health monitoring: NDT-integrated aerostructures enter service. *CompositesWorld*. Available at: <http://www.compositesworld.com/articles/structural-health-monitoring-ndt-integrated-aerostructures-enter-service> (accessed 31.7.2015).

3. Dubinskii, V. S., Zaitsev, M. D., Kryuchkov, E. I., Nesterenko, G. I., Udzhukhu, A. Yu., Shanygin, A. N. Zavisimost' resursnykh kharakteristik srednemagistral'nykh passazhirskikh samoletov ot vesa konstruksii planera [The medium-haul passenger aircraft lifetime characteristics dependence by the airframe weight]. *Trudy TsAGI – Proc. of the TsAGI*, Moscow, 2002, no. 2658, pp. 207 – 214.

4. Dryden, H. L. Turbulence Investigations at the National Bureau of Standards. *Proc. Vth Intern. Congress for Applied Mechanics*, Cambridge, Mass., 1938, pp. 362.

5. Von Karman, Th. Sur la Theorie Statistique de la Turbulence. *Collected works of Theodore von Karman*, 1948, vol. IV, pp. 357 – 359.

6. Taylor, J. *Manual on Aircraft Loads*. New York, Pergamon Publ., 1965. 350 p. (Russ. ed.: Taylor, J. *Nagruzki, deistviyushchie na samolet*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 371 p.).

7. Korolev, V. S. Integral'naya povtoryaemost' vertikal'nykh indikatornykh poryvov atmosfery, opisivayemaya logarifmicheski normal'nyim zakonom veroyatnosti [The integrated repeatability of the vertical indicator atmospheric gusts described by a log-normal probability law]. *Nauchnyj vestnik GosNII GA – Scientific Bulletin of GosNII GA*. Moscow, 2015, no. 7 (318), pp. 45 – 53.

8. OST 1 02514-84. Model' turbulentnosti atmosfery [Industry Standard 1 02514-84. Atmospheric turbulence model]. – Vved. 01.01.1986. 13 p.

9. Orlova, T. I., Strelkov, V. V., Tsymbalyuk, V. I. Monitoring nagruzok i nakoplennoi ustalostnoi povrezhdaemosti v usloviyakh ekspluatatsii: realizatsiya, rezul'taty i vozmozhnosti [Loads and accumulated fatigue of damage monitoring in operation: the implementation, results and opportunities]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk: materialy konferencii «Sistemy upravleniya aviastraitel'nyim predpriyatiem»* [Proc. of the Samara Scien-

tific Center of the Russian Academy of Sciences “Aircraft manufacturing enterprise management systems”]. Samara, “RAKS - S” Publ., 2014, vol. 16, no. 1 (5), pp. 1512 – 1520.

10. Feigenbaum, Yu. M., Sokolov, Yu. S. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya otechestvennoi sistemy monitoringa ekspluatatsii silovoi konstruksii grazhdanskikh VS [Analysis of the current state and development prospects of the civil aircraft power structure domestic operation monitoring system]. *Nauchnyj vestnik GosNII GA – Scientific Bulletin of GosNII GA*, Moscow, 2015, no. 7 (318), pp. 14 – 23.

11. Bojko, T. S. Vlijanie parametrov profilja tipovogo poleta na dolgovechnost' kryla nemanevrennogo samoleta [Model flight profile parameters influence on

the non-maneuvering aircraft wing durability]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov : sbornik nauchnyh trudov Nacional'nogo ajerokosmicheskogo universiteta im. N. E. Zhukovskogo «HAI» – Aircraft structure design and production questions : proc. of the National Aerospace University “KhAI”*, 2009, no. 3 (59), pp. 7 – 17.

12. Fomichev, P. A., Bojko, T. S., Pinchuk, D. A., Zaruckij, A. V. *Raschet dolgovechnosti reguljarnykh zon kryla samoleta Be-200ChS* [Be-200ES aircraft wing regular zones durability calculation] : otchet o NIOKR (promezhutochn.): Ch. 3. Nacional'nyj ajerokosmicheskij universitet im. N. E. Zhukovskogo «HAI» [National Aerospace University “KhAI”], Kharkov, 2010. 82 p.

*Поступила в редакцию 12.02.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016*

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ПОВТОРЮВАЛЬНОСТІ ВОЗДУШНИХ ПОРИВІВ, ЩО ДІЮТЬ НА ЛІТАК В ТИПОВОМУ ПОЛЬОТІ

*Т. С. Бойко*

Розроблено методику інтегральної повторювальності поривів на етапі проектування літака з урахуванням передбачуваних умов його експлуатації. Виконано зіставлення розрахункових кривих, які отримано за безперервною та дискретною моделями турбулентності, з результатами льотних вимірювань. Показано, що обидві моделі турбулентності добре узгоджуються між собою та з даними льотних вимірювань в зоні малих швидкостей поривів, яка визначає ресурс конструкції. Однак в області екстремальних поривів достатньою точністю володіє лише модель безперервної турбулентності. Проведено аналіз інтегральної повторювальності поривів на малих висотах. Для дискретної схеми турбулентності відмічено доцільність використання додаткової кривої на висотах 0 – 0,9 км. Наведено результати розрахунку кривих інтегральної повторювальності поривів за політ літаків різного типу, показано похибку використання осереднених кривих за даними льотних вимірювань.

**Ключові слова:** навантаження, порив, турбулентність, повторювальність, типовий політ.

## METHOD FOR THE CALCULATION OF INTEGRATED GUST REPEATABILITY ACTING ON THE AIRCRAFT IN THE TYPE-FLIGHT

*T. S. Bojko*

Method for the integrated gust repeatability calculation at the aircraft design stage taking into account its anticipated operation conditions is developed. Calculated curves for continuous and discrete turbulence models are compared with the flight measurements. It was demonstrated that both turbulence models are in good agreement with the data of flight measurements in the area of low velocity gusts defining design resource. But only continuous turbulence model has sufficient accuracy in extreme gusts. Integral gusts repeatability at low altitudes is analyzed. The feasibility of additional curve using at heights 0 – 0.9 km is noted for discrete turbulence scheme. The calculation results of the integral gusts repeatability curves for the whole flight are given for the various aircraft types. The error of the average flight measurements curves using is shown.

**Key words:** loads, gust, turbulence, repeatability, type-flight.

**Бойко Татяна Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры прочности летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: nil\_prochnost@khai.edu.

**Bojko Tatiana Sergeevna** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Department of aircraft strength, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: nil\_prochnost@khai.edu.