

Вероятностные характеристики эксплуатационных нагрузок, действующих на самолет

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Из итогов оценки экспериментальных кривых повторяемости перегрузок вытекает, что распределения маневренных перегрузок для самолетов всех типов близки к нормальному закону. Приращения перегрузок в момент посадки распределяются также нормально. Перегрузки от беспокойного воздуха (болтаночные перегрузки), характерные для нагружения пассажирских и транспортных самолетов, можно представить законом наибольших значений и экспоненциальным законом, которые при проведении проектировочных расчетов приводят к близким результатам. Коэффициенты вариации нагрузок самолетов $v_s = 0,07 \dots 0,1$, коэффициенты асимметрии математического ожидания нагрузок относительно их нормируемых величин составляют 3...6%.

Ключевые слова: надежность, вероятность, функция распределения, несущая способность, статистика, перегрузка, коэффициент безопасности.

Целью любых проектировочных расчетов является обеспечение надежности летательного аппарата, т.е. способности конструкции выдерживать приложенные к ней нагрузки за весь период ее эксплуатации. Принципы проектирования включают определение нагрузок и их характеристик, расчеты несущей способности конструкции и установление связи между нагрузками и прочностью. Применение вероятностно-статистических методов проектирования позволяет обеспечить требуемую надежность, учесть случайные отклонения размеров элементов, механических свойств конструкционных материалов и эксплуатационных нагрузок от их нормативных величин, обосновать значения коэффициентов безопасности.

Вероятностные методы проектирования конструкций предполагают, что известны законы распределения внешних нагрузок $F_S(x)$ и несущей способности $F_N(x)$. Тогда надежность конструкции определится по зависимости [3]

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} f_N(x) \cdot F_S(x) dx, \quad (1)$$

где $f_N(x)$ – плотность распределения несущей способности конструкции;

$F_S(x)$ – функция распределения экстремальных значений эксплуатационных нагрузок, действующих на самолет.

Вероятностные характеристики несущей способности (НС) исследуются в ряде работ, например [3]. Настоящее исследование посвящено статистическому анализу нагрузок, действующих на самолет.

Статистический анализ нагрузок в основном базируется на кривых повторяемости экстремальных перегрузок, полученных экспериментальным путем их измерения при летных испытаниях.

В нормах к прочности самолетов обычно задают значения максимальных эксплуатационных перегрузок и соответствующие им величины коэффициентов безопасности. Под максимальными эксплуатационными нагрузками понимают предельные значения, которые могут достигаться при нормальной эксплуатации самолетов на предельно допустимых режимах. Для вновь проектируемых ЛА можно использовать общие закономерности, характерные для распределения маневренных и болтаночных (полет в беспокойном воздухе) перегрузок.

Распределение маневренных перегрузок по данным статистического анализа внешних нагрузок при выполнении маневров для самолетов разных типов близко к нормальному закону [2]. При больших сроках эксплуатации большинство самолетов выполняет операции с выходом на предельные режимы нагружения, при этом выполнение маневров связано с действием летчика и возможные отклонения в перегрузках должны быть близки к “кривой ошибок”. Повторяемость маневренных перегрузок получается из результатов летных испытаний, так что влияние перегрузок от беспокойного воздуха здесь исключается.

На рис. 1 на нормальной вероятностной шкале приведена функция распределения экстремальных перегрузок маневренного самолета [2]. Большие значения перегрузок при $F > 0,5$ распределены по закону, близкому к нормальному.

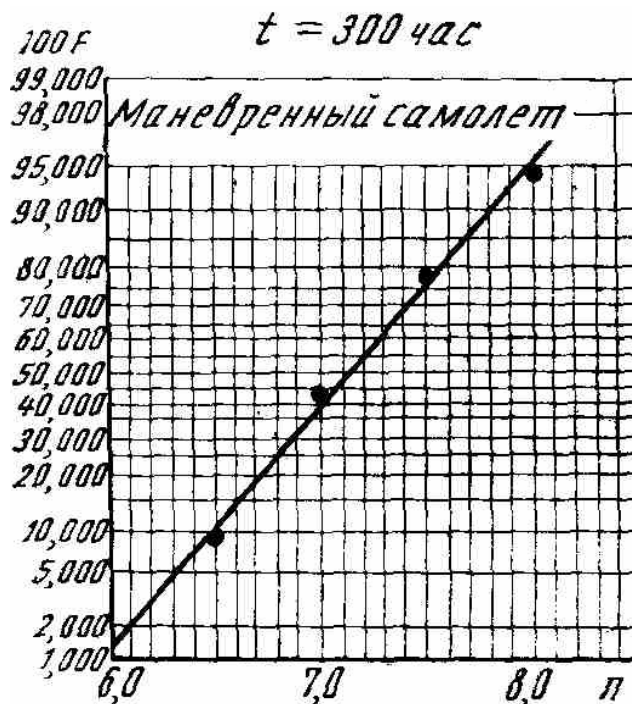


Рис. 1. Функция распределения экстремальных маневренных перегрузок в центре тяжести маневренного самолета

На рис. 2 приведена функция распределения максимальных маневренных перегрузок для ограниченно маневренного самолета, когда $n_{\max}^{\circ} = 3,5 \dots 5,5$. При этом из этих перегрузок были выделены болтаночные перегрузки. На рис. 3 на нормальной вероятностной шкале приведена функция распределения максимальных маневренных перегрузок для транспортного самолета при $n_{\max}^{\circ} = 1,2 \dots 1,4$. Перегрузки, обусловленные выполнением того или иного маневра, ограничены определенными условиями эксплуатации ЛА данного класса, вытекающими из его назначения. Эти ограничения и определяют многообразие расчетных случаев нагружения и соответствующих им маневренных перегрузок.

Приведенные результаты распределения экстремальных значений маневренных перегрузок для самолетов всех типов близко к нормальному закону (см. рис. 3).

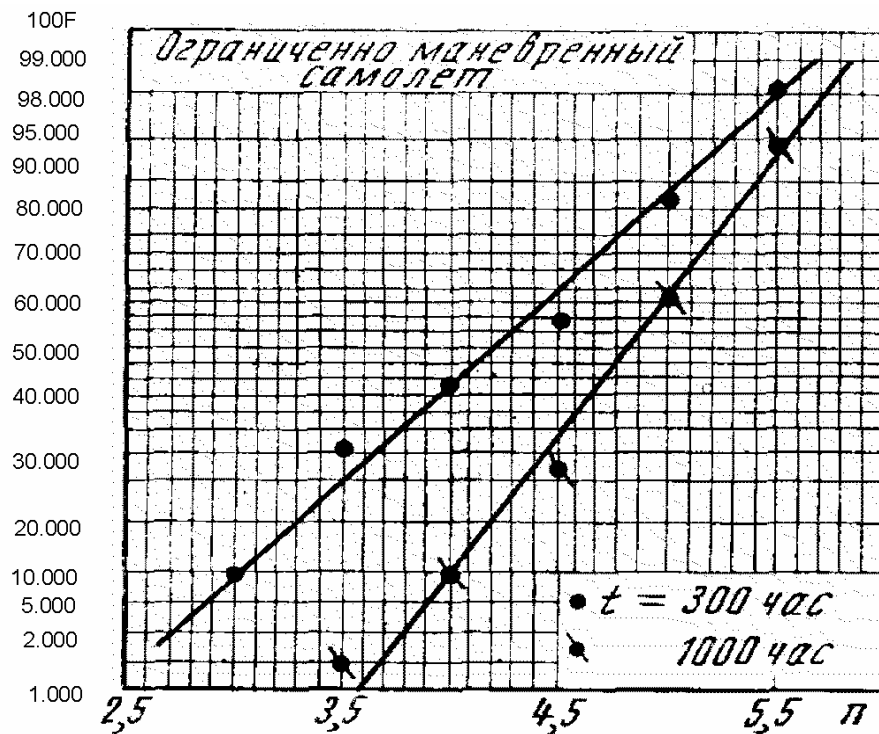


Рис. 2. Функция распределения экстремальных маневренных перегрузок для ограниченно маневренных самолетов

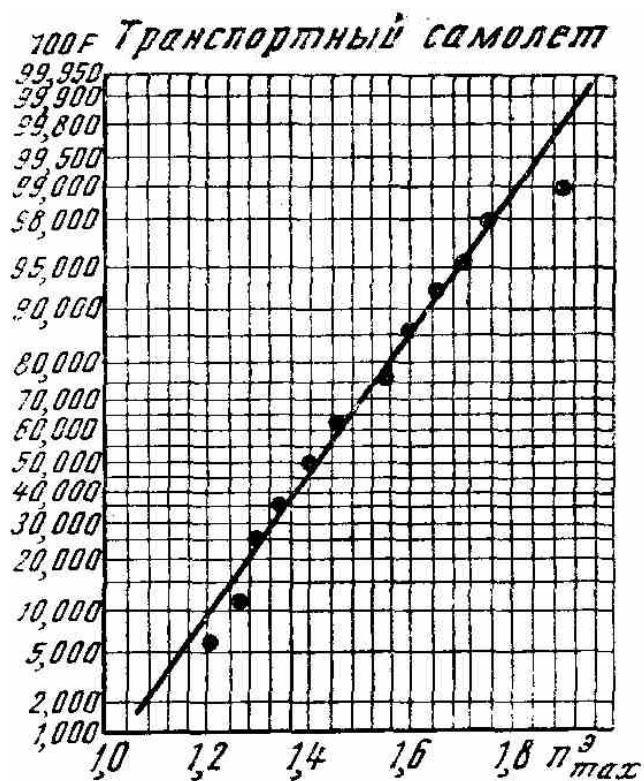


Рис. 3. Функция распределения экстремальных маневренных перегрузок для транспортных самолетов

Вместе с тем величины маневренных перегрузок для разных самолетов различны. Например, для маневренных самолетов характеристики эксплуатационных перегрузок достигают 8 и выше, для ограниченно маневренных они составляют 3,5...5,5, а для неманевренных транспортных – достигают значений 1,2...1,8 и не могут быть положены в основу расчетных случаев нагружения.

Распределения перегрузок от неспокойного воздуха определяются атмосферной турбулентностью (болтаночные перегрузки, вызванные эффективными воздушными порывами) [2]. Среднее значение (математическое ожидание) перегрузки при полете в неспокойном воздухе определяется как

$$n_{\text{бо}} = 1 + AW_{\text{эф.о}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{эф.о}}$ – эффективная скорость воздушных порывов.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{W_{\text{эф}}}$ и коэффициент вариации $v_{\text{эф}}$ будут соответственно таковы:

$$\sigma_{n_{\text{бо}}} = A\sigma_{W_{\text{эф}}}; \quad v_{\text{эф}} = \frac{A\sigma_{W_{\text{эф}}}}{1 + AW_{\text{эф.о}}}. \quad (3)$$

Анализ кривых повторяемости воздушных порывов $W_{\text{эф}}$ показывает, что распределения экстремальных значений перегрузок $n_{\text{бо}}$ при $A = \text{const}$ отличаются от нормального и для больших значениях могут быть представлены двойным показательным законом (законом наибольших значений).

Для самолетов, когда летчик может уменьшать скорость полета при попадании в неблагоприятные метеорологические условия, распределение экстремальных нагрузок также близко к двойному показательному закону. Это подтверждается функцией распределения перегрузок от неспокойного воздуха, полученной по результатам летных испытаний самолетов с малыми скоростями (рис. 4).

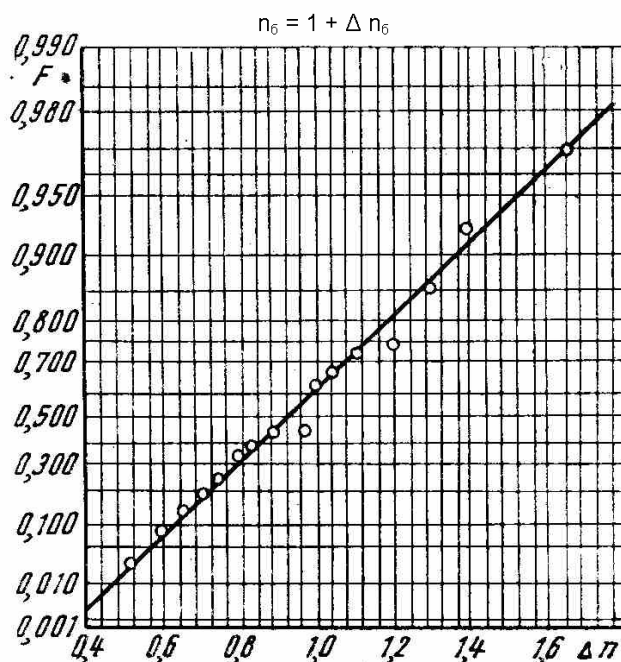


Рис. 4. Функция распределения экстремальных перегрузок от неспокойного воздуха на вероятностной шкале двойного показательного закона

Для более общих случаев нагружения самолетов в условиях болтаночных перегрузок для нисходящих и восходящих порывов характерно распределение, состоящее из двух экспоненциальных кривых [4]. При этом 98,4% всех воздушных порывов принадлежат слабым характеристикам. Однако 1,6% воздушных порывов принадлежат совокупности с более суровыми характеристиками. Эти порывы являются определяющими при проектировании.

Экспериментальные данные больших нагрузок в момент посадки показывают, что посадочные и вертикальные скорости самолета в момент приземления и возникающие приращения перегрузок распределены нормально.

Таким образом, анализ законов распределения экстремальных значений внешних нагрузок, действующих на самолет, по итогам оценки экспериментальных кривых повторяемости перегрузок показывает, что наиболее распространенными законами являются: нормальный, распределение наибольших значений, экспоненциальный. Встречаются также логарифмически нормальный, специальный в отдельных случаях, которые подлежат самостоятельному анализу.

Таким образом, маневренные перегрузки для всех типов летательных аппаратов (маневренных, ограниченно маневренных) удовлетворительно согласуются с нормальным законом. Перегрузки от беспокойного воздуха (болтаночные перегрузки) приближенно можно представить законом наибольших значений и экспоненциальным законом. Эти распределения характерны для пассажирских и транспортных неманевренных самолетов.

Проектировочные расчеты конструкций летательных аппаратов проводятся обычно по нормируемым значениям коэффициента безопасности f_n , определяемым соотношением

$$f_n = \frac{N_n}{S_n}, \quad (4)$$

где N_n – номинальное значение несущей способности конструкции, определяемое по размерам элементов, согласно чертежам и справочным данным конструкционных материалов;

S_n – нормируемое значение нагрузки.

Такие расчеты не учитывают случайный характер нагрузки и несущей способности. Вместе с тем несущая способность конструкции носит случайный характер (вследствие неизбежных технологических допусков на размеры) изменчивости механических свойств материалов и эксплуатационных нагрузок.

Предпочтительно проводить проектировочные расчеты по нормируемой заданной надежности, которая может быть оговорена заказчиком, НЛГС, АП или соответствовать лучшим образцам авиационной техники. Тогда по заданной надежности следует установить коэффициент безопасности f_n и привлекать обычные методы проектировочных расчетов. Такая зависимость представлена на рис. 5, где

$$\overline{f_n} = \frac{1 + \alpha_N}{1 + \alpha_S} f_n. \quad (5)$$

На рис. 5 обозначено:

v_N, v_S – коэффициенты вариации несущей способности N и нагрузки S соответственно;

1, 2, 3 – сочетания нормального закона распределения несущей способности и нормального (1), наибольших значений (2) и экспоненциального (3) распределений экстремальной эксплуатационной нагрузки соответственно;

α_N , α_S – коэффициенты смещения математических ожиданий N и S относительно их нормируемых величин:

$$\alpha_N = \frac{m_N - N_n}{N_n}; \quad \alpha_S = \frac{m_S - S_n}{S_n}; \quad (6)$$

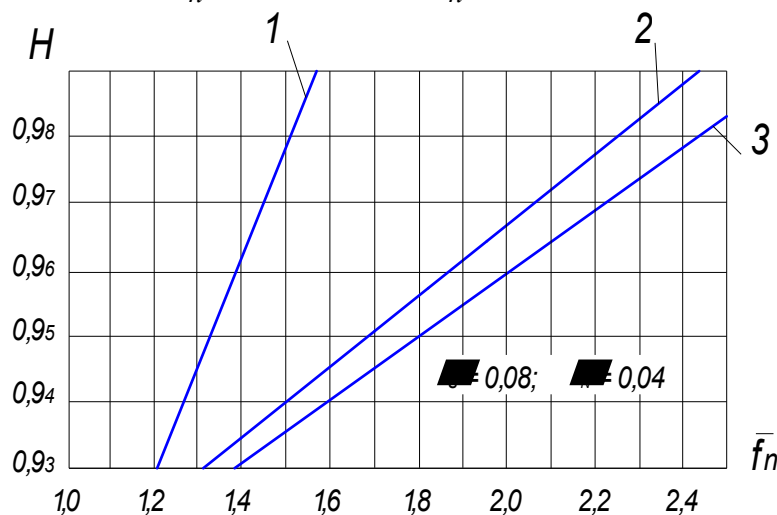


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента безопасности f_n от уровня надежности H

m_N , m_S – математические ожидания несущей способности N и нагрузки S ;

N_n , S_n – нормированные номинальные величины N и S .

Нормируемая нагрузка S_n представляет собой медиану распределения [1].

Тогда для варианта распределения нагрузки по закону наибольших значений $\alpha_S = 0,1642 v_S / (1 - 0,1642 v_S)$, для нормального закона распределения $\alpha_S = 0$, для экспоненциального – $\alpha_S = -0,293 v_S$.

Коэффициент вариации нагрузки для самолетов колеблется в пределах 0,07...0,1, для беспилотных ЛА он может достигать 0,2...0,25.

Анализ графиков, приведенных на рис. 5, подтверждает существенную зависимость коэффициента безопасности от вероятностных характеристик распределения эксплуатационных нагрузок и несущей способности. Например, повышение v_N с 4 до 8% при $H = 0,9_6$ повышает f_n и массу на 10...20% в сочетании 2, в сочетании 3 – изменяет f_n на 30...40% и существенно повышает массу конструкции при $H = \text{const}$ в сравнении с сочетанием 1. Сочетания 2 и 3 отличаются несущественно, следовательно, болтаночные перегрузки для неманевренных самолетов определяются законами наибольших значений или экспоненциальным законом.

Список литературы

1. Селихов А.Ф. Вероятностные методы в расчетах прочности самолета / А.Ф. Селихов, В.М. Чижов. – М.: Машиностроение, 1987. – 237 с.

2. Чижов В.М. Статистический анализ эксплуатационных нагрузок / В.М. Чижов // Труды ЦАГИ, вып. 1462. – М., 1973. – С. 3–16.

3. Малашенко Л.А. Проектирование конструкций летательных аппаратов с учетом случайных факторов: учеб. пособие / Л.А. Малашенко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2009. – 105 с.

4. Тейлор Джеймс. Нагрузки, действующие на самолет / Джеймс Тейлор. – М.: Машиностроение, 1971. – 372 с.

Рецензент: к.т.н., проф., А.И. Рыженко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 30.05.09.

Імовірнісні характеристики експлуатаційних навантажень, що діють на літак

Із підсумків оцінки експериментальних кривих повторюваності перевантажень випливає, що розподіли маневрених перевантажень для літаків усіх типів близькі до нормального закону. Прирісти перевантажень у момент посадки розподіляються також нормально. Перевантаження від неспокійного повітря (перевантаження від бовтанки), характерні для навантаження пасажирських і транспортних літаків, можна подати законом найбільших значень і експоненціальним законом, які при проведенні проектувальних розрахунків приводять до близьких результатів. Коефіцієнти варіації навантажень літаків $v_s = 0,07 \dots 0,1$, коефіцієнт асиметрії математичного сподівання навантажень відносно їхніх нормованих величин становлять 3...6%.

Ключові слова: надійність, імовірність, функція розподілу, несуча здатність, статистика, перевантаження, коефіцієнт безпеки.

Probabilistic properties of operational loadings acting to airplane

According to the results of experimental curves the evaluation of repetition of acceleration it follows that the maneuvering acceleration distributions for the airplanes of all types are close to the normal law. The increments in acceleration during the landing moment are distributed normally. Accelerations from rough air (turbulent accelerations), typical for loading the passenger and transport airplanes, may be presented by the largest values and exponential law, which furnish the close results while designing. Coefficients of load variation of airplanes are $v_s = 0,07 \dots 0,1$, asymmetry coefficient of expectation of loads relative to their normalized values are 3...6%.

Keywords: reliability, probability, distribution function, bearing capacity, statistics, acceleration, safety coefficient.