

### Краткая теоретическая часть

Значительную угрозу безопасности полетов создает турбулентная атмосфера. При воздействии турбулентной атмосферы на воздушное судно (ВС) изменяются углы атаки  $\alpha$ , углы скольжения  $\beta$  и воздушная скорость  $V$ , что сопровождается изменением аэродинамических сил и моментов. Знакопеременные нагрузки, воспринимаемые экипажем как «болтанка» ВС, приводят к следующим отрицательным последствиям: повышают темп расходования ресурса планера и вероятность усталостных разрушений конструкции ВС в полете, создают дискомфорт для экипажа, повышая его утомляемость и снижая точность пилотирования, создают помехи в работе системы автоматического управления, увеличивают опасность превышения предельных перегрузок ВС и выхода его на режим сваливания.

**Турбулентность** - состояние атмосферы, при котором наблюдаются неупорядоченные вихревые движения различных масштабов и различных скоростей. Оси турбулентных вихрей быстро меняют свое положение в пространстве и бывают ориентированы в самых различных направлениях.

#### **Причины турбулентности:**

- трение воздушного потока о поверхность земли и как следствие - большие вертикальные градиенты ветра в нижнем слое;
- деформация воздушных течений горами;
- неодинаковое нагревание различных участков подстилающей поверхности, приводящее к развитию восходящих и нисходящих конвективных воздушных потоков и, следовательно, вихреобразованию (особенно на границах этих потоков);
- процессы облакообразования, при которых выделяется тепло конденсации и изменяется характер полей температуры и ветра;
- взаимодействие воздушных масс с различными термодинамическими характеристиками, на границе которых очень резко выражены горизонтальные градиенты температуры и ветра;
- волновые движения на инверсионных слоях, переходящие при определенных условиях в вихревые образования.

Интенсивность болтанки определяется перегрузкой или ее приращением. **Перегрузка** ( $n$ ) - отношение подъемной силы в данный момент времени ( $Y$ ) к подъемной силе горизонтального полета ( $Y_0$ ).

$$n = \frac{Y}{Y_0} \quad (1)$$

В горизонтальном полете подъемная сила равна массе самолета ( $Y_0 = G$ ), а любая мгновенная величина равна средней плюс ее отклонение от этого среднего ( $Y = Y_0 + \Delta Y$ ), поэтому:

$$n = \frac{Y_0 + \Delta Y}{G} = 1 + \frac{\Delta Y}{G}. \quad (2)$$

Перегрузка, которую испытывает самолет, зависит от типа самолета, высоты и скорости его полета и скорости вертикального порыва. Два разных

самолета, выполняющих полет на одной высоте с одинаковой скоростью, при встрече с одним и тем же порывом будут испытывать разную перегрузку.

**Приращение перегрузки** находится по формуле:

$$\Delta n = n - 1 = \frac{\Delta Y}{G} = \frac{mj}{mg} = \frac{j}{g}, \quad (3)$$

где  $j$  – ускорение, которое получает ВС при полете в турбулентной атмосфере.

Для обеспечения однозначности расчетов воздействия турбулентности на ВС создаются **модели атмосферной турбулентности**. В соответствии с одной из таких моделей атмосферная турбулентность представляется стационарным случайным процессом и делится на слабую ( $b_1 \approx 1$  м/с) и сильную ( $b_2 \approx 3$  м/с). В табл. 1 приведены нормированные характеристики модели для различных высот полета  $H$ , где обозначено:  $L$  – масштаб турбулентности;  $b_1$  и  $b_1$  – среднеквадратические значения средней квадратической скорости порывов соответственно для слабой и сильной турбулентности;  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$  – относительное время пребывания ВС в слабой и сильной турбулентности.

Таблица 1

| $H, \text{ м}$ | $L, \text{ м}$ | Слабая турбулентность  |                    | Сильная турбулентность |                    |
|----------------|----------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|                |                | $\bar{t}_1, \text{ с}$ | $b_1, \text{ м/с}$ | $\bar{t}_2, \text{ с}$ | $b_2, \text{ м/с}$ |
| 0...300        | 150            | 0,99999                | 0,826              | 0,00001                | 3,25               |
| 300...600      | 150            | 0,400                  | 1,00               | 0,00030                | 2,99               |
| 600...3000     | 300            | 0,080                  | 1,16               | 0,00080                | 2,99               |
| 3000...6000    | 300            | 0,050                  | 1,13               | 0,00042                | 3,17               |
| 6000...9000    | 300            | 0,084                  | 1,07               | 0,00015                | 3,41               |
| 9000...12000   | 300            | 0,085                  | 1,04               | 0,00005                | 3,38               |

Ограничимся рассмотрением воздействия только вертикальных случайных порывов, которые, вызывая изменение углов атаки, могут создать одну из следующих ситуаций: превышение коэффициента подъемной силы, соответствующее началу потери устойчивости по перегрузке; превышение коэффициента подъемной силы, соответствующее возникновению неустойчивой работы силовой установки (воздухозаборника и двигателя); превышение коэффициента подъемной силы, соответствующее потере поперечной управляемости; превышение коэффициента подъемной силы, соответствующее сваливанию ВС; превышения эксплуатационной перегрузки  $n_{\text{умакс}}^p$  или расчетной перегрузки  $n_y^p$ , соответствующие появлению остаточных деформаций или разрушению ВС.

Характеристики болтанки при различных значениях приращения перегрузки приведены в табл. 2.

Последствием превышения заданного уровня эксплуатационных перегрузок является возможность появления остаточных деформаций

планера и его частей (крыла, оперения, фюзеляжа и т.д.). Факт превышения эксплуатационной перегрузки устанавливается опросом экипажа и подтверждается анализом записей бортовых самописцев. Выявление последствий превышений для самолета производится путем тщательного осмотра его силовых элементов и нивелировкой самолета.

Так как коэффициент подъемной силы  $C_y$  и перегрузка  $n_y$  связаны соотношением  $n_y = \frac{C_y \rho_H V^2 S}{2G}$ , то во всех рассмотренных случаях появление особой ситуации можно свести к превышению соответствующего уровня положительной  $n_{y1}$  или отрицательной  $n_{y2}$  перегрузок (рис. 1). В первом приближении эти состояния можно принять адекватными авиационному происшествию.

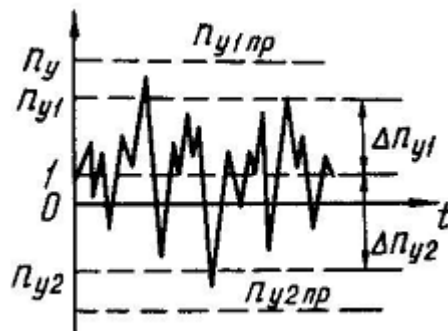


Рис. 1. Превышение перегрузок ВС

Вероятность превышения эксплуатационной перегрузки (или уровень риска):

$$Q = 1 - e^{-\lambda_{00}t}. \quad (4)$$

Вероятность непревышения эксплуатационной перегрузки (или уровень безопасности полета):

$$P = e^{-\lambda_{00}t}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{00} = \bar{t}_1 \lambda_{01} + \bar{t}_2 \lambda_{02}$  - это число превышений заданного уровня перегрузки за один час полета  $\Delta n_y$ , 1 / час.

Для интенсивностей  $\lambda_{01(02)}$  профессором Вороновичем А.П. было получено следующее выражение:

$$\lambda_{01(02)} = \lambda_o e^{-\frac{\Delta n_y}{Bb_{1(2)}}}, \quad (6)$$

Таблица 2

## Виды болтанки и их характеристика

| <i>Интенсивность болтанки</i>        | <i>Пирацение перегрузки <math>\Delta n</math></i> | <i>Характеристика поведения самолета при болтанке</i>  | <i>Характеристика комфорта пассажиров</i>  |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Слабая болтанка                      | $\pm 0,2 g$                                       | Отдельные легкие вздрагивания самолета.  | При длительном действии вызывает неприятные ощущения у отдельных пассажиров.   |
| Умеренная болтанка                   | $\pm 0,5 g$                                       | Частые толчки, связанные с покачиванием самолета и изменением высоты, но не вызывающие затруднений в пилотировании самолета. Наблюдаются заметные колебания стрелок индикаторов в пилотажных приборах: вариометра и указателя скорости. Установившийся режим полета сохраняется.   | Вызывает неприятные ощущения у значительной части пассажиров и затрудняет ходьбу в самолете  |
| Сильная болтанка                     | $\pm 1,0 g$                                       | Резкие вздрагивания и отдельные броски самолета, сопровождающиеся большими и частыми кренами и рысканьем. Изменение высоты, частые и резкие перегрузки затрудняют использование автопилота. Отмечается неустойчивая работа вариометра и указателя скорости. Установившийся режим полета нарушается по высоте и курсу. При больших отрицательных перегрузках ощущается невесомость, а при положительных, наоборот, сильное прижатие к креслу. | Незакрепленные предметы начинают смещаться. Ходжение по самолету может вызвать ушибы пассажиров. Необходимо пристегивание пассажиров ремнями.  |
| Штормовая или очень сильная болтанка | $\pm 1,1 g$                                       | Исключительно резкие броски самолета, сопровождающиеся большими перегрузками, сильно прижимающими или отрывающими от кресла. Полет происходит с большими отклонениями по высоте и курсу, нарушается установившийся режим полета. Показания вариометра и указателя скорости сильно искажаются. Ухудшается управляемость самолета. Неправильным действием пилота может быть создан режим по скорости, опасный для прочности самолета.          | Тяжело переносится большинством пассажиров, вызывает болезненные явления и утомляет экипаж<br>Вызывает отделение кресел и зависание на ремнях, а при положительных перегрузках - затяжное прижатие к креслам. В случае непристегивания ремней пассажиры могут получить травмы и сильные ушибы головы.<br>Резкие и большие перегрузки вызывают у подавляющего большинства пассажиров болезненные явления. |

В этом выражении:

$B$  - коэффициент, характеризующий чувствительность ВС к атмосферной турбулентности, равный:

$$B = KK' \frac{C_y^\alpha \rho V S}{2G}, \quad (7)$$

$\Delta n_y$  - нормируемый уровень предельно допустимого приращения перегрузки,

$\lambda_o$  - средняя частота пересечения нулевого значения с постоянным знаком производной, рассчитываемая по формуле:

$$\lambda_o = \frac{V}{\sqrt{b_\alpha L}} \cdot \frac{\nu}{KK'} \cdot 10^3 \left( \frac{1}{\text{час}} \right), \quad (8)$$

$b_\alpha$  - средняя аэродинамическая хорда крыла,

$L$  - масштаб турбулентности,

$\nu$  - коэффициент, учитывающий влияние переменности порывов по хорде крыла и нестационарности обтекания на  $\lambda_o$ . При  $M < 1,0$  можно принять  $\nu = 0,4$ .

Значения приращения перегрузок, соответствующие предельным параметрам по прочности и по аэродинамике определяются по следующим формулам:

– по максимальной эксплуатационной перегрузке:

$$\Delta n_y^{\text{э}} = n_y^{\text{э}} - 1, \quad (9)$$

– по расчетной перегрузке:

$$\Delta n_y^p = n_y^p - 1, \quad (10)$$

– по  $C_{y_{\text{унн}}}$  соответствующему началу неустойчивости по перегрузке:

$$\Delta n_{\text{нн}} = \frac{C_{y_{\text{унн}}} \rho (\alpha_n M)^2}{2G/S} - 1, \quad (11)$$

– по  $C_{y_{\text{унн}}}$  соответствующему сваливанию ВС:

$$\Delta n_{\text{ycb}} = \frac{C_{y_{\text{cb}}} \rho (\alpha_n M)^2}{2G/S} - 1. \quad (12)$$

Коэффициент ослабления порывов  $K$  рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\sqrt{1 - 1,5 \frac{\bar{Y}^\alpha}{\beta}}}{1 - \frac{\bar{Y}^\alpha}{\beta}}, \quad (13)$$

где:

$$\bar{Y}^\alpha = -\frac{C_y^\alpha g S}{m V}, \quad \beta = \frac{V}{L}, \quad g = \frac{\rho V^2}{2}. \quad (14)$$

Коэффициент  $K'$ , учитывающий влияние нестационарности на значение среднеквадратического приращения перегрузки, определяется по графикам рис. 2 для  $\mu = \frac{2m}{C_y^\alpha \rho S b_\alpha}$ ,  $\chi = \frac{b_\alpha}{L}$ .

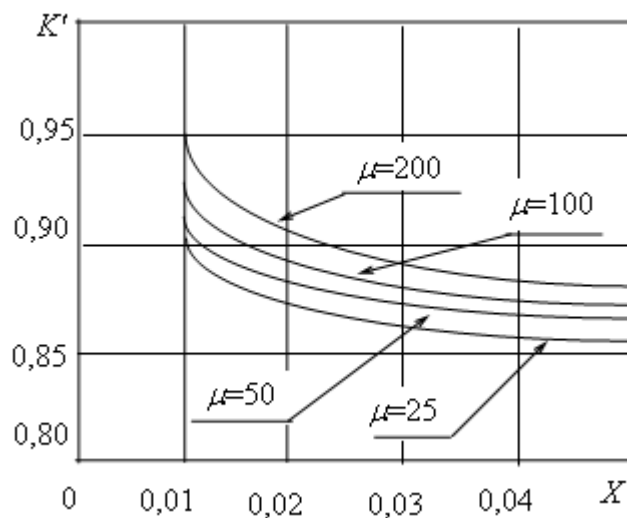


Рис. 2. Значения коэффициента  $K'$  в зависимости от  $\mu$  и  $\chi$ .

Из анализа выражений (4-6) следует, что уменьшить вероятность авиационного происшествия  $Q$  в условиях воздействия атмосферной турбулентности можно увеличением предельного приращения перегрузки  $\Delta n_y$  и уменьшением коэффициента  $B$ , а также уменьшением  $\lambda_0$ .

Все средства и мероприятия по повышению безопасности полетов в турбулентной атмосфере можно разделить на технические и эксплуатационные; технические разрабатываются при создании самолета, эксплуатационные – в период его эксплуатации.

**Технические мероприятия.** Они направлены на снижение чувствительности самолета к атмосферной турбулентности, то есть на уменьшение коэффициента  $B$ . Последнее, как видно из (7), может быть достигнуто уменьшением коэффициентов  $C_y^\alpha$  и  $K$  (несмотря на то, что при уменьшении  $K$  возрастает  $\lambda_0$ ).

Применение автомата устойчивости или автопилота позволяет при полете в турбулентности слабой интенсивности уменьшением коэффициента  $K$  уменьшить на 20...30% вероятность  $Q$ . Однако с увеличением интенсивности турбулентности положительный эффект этих автоматов снижается. Это объясняется как увеличением влияния инерционности самолета, так и влиянием ограничения доверяемых автомату углов отклонения рулей.

Большой эффект по уменьшению  $K$  дает применение систем активного управления, позволяющих изменять подъемную силу без изменения угла атаки самолета. Применение таких систем позволяет на порядок уменьшить вероятность  $Q$ .

Применение технических средств, способных обнаружить зоны интенсивной турбулентности в грозовой области и в ясном небе и выдать

рекомендации экипажу по изменению маршрута полета, также позволяет существенно уменьшить  $Q$ .

**Эксплуатационные мероприятия.** В эксплуатации на повышение безопасности полета, определяемой воздействием атмосферной турбулентности, можно влиять соответствующим выбором режимов полета, определенной техникой пилотирования самолета и заданием соответствующих режимов работы системы автоматического управления.

Безопасность полета в турбулентной атмосфере зависит от скорости  $V$  и высоты полета  $H$  из-за возможности превышения ограничений по прочности конструкции и по выходу самолета на режим сваливания. Из выражений (6-8) видно, что при заданном максимальном превышении эксплуатационной перегрузки при увеличении скорости полета возрастают  $\lambda_0$  и  $B$ , что приводит к возрастанию вероятности авиационного происшествия  $Q$  (рис. 3, кривая 1). Таким образом, из условия непревышения прочностных ограничений от воздействия турбулентности желательно уменьшить скорость полета. При

уменьшении скорости полета возрастает  $C_y = \frac{G}{qS}$ , что приводит к уменьшению  $\Delta n_{y1}$ , а следовательно, к увеличению  $Q$  (кривая 2).

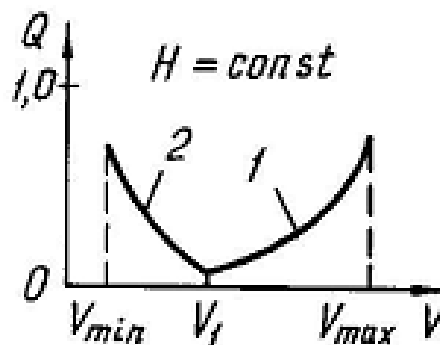


Рис. 3. Зависимость вероятности превышения эксплуатационной перегрузки от скорости полета.

Таким образом, существует некоторая скорость  $V_l$ , а точнее – диапазон наиболее безопасных скоростей полета в турбулентной атмосфере, на которых можно рекомендовать выполнение полета, если главными являются требования по безопасности полета.

Аналогично прослеживается и влияние высоты полета на вероятность  $Q$ . При увеличении высоты полета, так как уменьшается плотность  $\rho$ , это вызывает уменьшение  $B$  и уменьшение вероятности превышения прочностных ограничений, то есть уменьшение вероятности  $Q$  (кривая 1 на рис. 4). Однако при заданном коэффициенте подъемной силы сваливания  $C_{у св}$  с увеличением высоты полета (как и при уменьшении скорости) возрастает  $C_y$ , что приводит к уменьшению  $\Delta n_{y1}$  и увеличению вероятности  $Q$  (кривая 2). На высоте  $H = H_1$  имеем  $Q_{\min}$ .

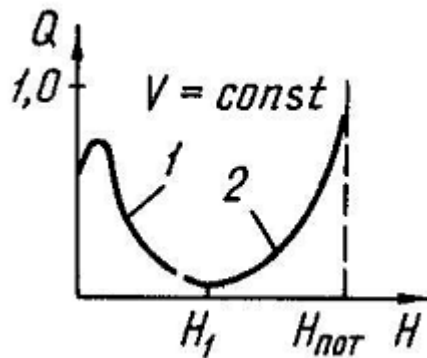


Рис. 4. Зависимость вероятности превышения эксплуатационной перегрузки от высоты полета.

Построив для данного самолета сетку таких графиков для эксплуатационного диапазона скоростей и высот полета, можно или подсказать наиболее безопасный по условиям воздействия атмосферной турбулентности режим полета, или оценить степень риска режима полета, определяемого полетным заданием.

**Рекомендации по технике пилотирования при попадании самолета в «болтанку»:**

- на высотах, близких к практическому потолку, необходимо уменьшить высоту на 2000...2500 м или до выхода из «болтанки»;
- при появлении «болтанки» на больших приборных скоростях необходимо снизить скорость полета;
- в зонах сильной турбулентности нельзя выполнять резких маневров, пилотирование должно быть плавным, а если возможно, то изменением скорости и высоты полета вывести ВС в область наиболее безопасных скоростей и высот полета;
- не стремиться строго выдерживать тангаж, не мешать устойчивому ВС восстанавливать  $\alpha$  и  $n_y$ .

Таким образом, совместным проведением технических и эксплуатационных мероприятий можно существенно снизить уровень риска  $Q$  от воздействия атмосферной турбулентности.