

УДК 629.735.33

Энергетический метод анализа массы рессорного шасси лёгкого самолёта

Кичеев В. Е.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,

Россия

e-mail: m.oskb@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается задача оценки массы рессор основных опор шасси. Получена аналитическая зависимость массы рессор от основных проектных параметров.

Ключевые слова: лёгкий самолёт, шасси, амортизация, рессора

Введение

В конструкции лёгкого самолёта часто применяется рессорное шасси, в котором в качестве амортизаторов используются рессоры, работающие на изгиб, и поглощающие основную часть энергии удара при посадке. На начальном этапе проектирования самолёта необходимо иметь достоверное значение относительной массы шасси. Эта задача может решаться с использованием статистики. Однако этот путь проблематичен, так как статистические данные имеют очень большой разброс. Можно воспользоваться известными формулами определения массы шасси. Но эти формулы разработаны для самолётов другой размерности с принципиально другими амортизаторами.

С целью последующей разработки методики расчёта массы шасси лёгкого самолёта ставится задача анализа влияния удельной нагрузки на крыло и механических характеристик материала на относительную массу рессор основных опор шасси.

Рассмотрим кинетическую энергию самолёта в момент посадки. Она находится по известной формуле

$$K = \frac{mV_y^2}{2} \quad (1)$$

где

m - масса самолёта;

V_y - вертикальная составляющая скорости.

С целью упрощения записи последующих формул и для большей наглядности кинетическую энергию самолёта представим в следующем виде

$$K = mgh \quad (2)$$

где

$$h = \frac{V_y^2}{2g} \quad (3)$$

g — ускорение силы тяжести.

Величина h имеет очевидный физический смысл. Это высота, падая с которой, самолёт развивает скорость V_y .

В авиационных правилах АП-23 для лёгких самолётов вертикальная скорость определяется по формуле

$$V_y = 0,9066 \sqrt[4]{P} \quad (4)$$

где

P — удельная нагрузка на крыло.

Подставим (4) в (3), получим

$$h = 0,0419 \sqrt{P} \quad (5)$$

Рассмотрим посадку на основные опоры шасси.

Считаем, что работа внешних сил, действующих на колёса основных опор, поглощается только амортизационной системой, состоящей из рессор и пневматиков колёс.

$$A = A_p + A_{\text{пн}} \quad (6)$$

где

A — работа внешних сил;

A_p — работа, поглощаемая всеми рессорами;

$A_{\text{пн}}$ — работа, поглощаемая всеми пневматиками колёс.

Из (6) имеем

$$A_p = A - A_{\text{пн}} \quad (7)$$

Преобразуем к виду

$$A_p = A \left(1 - \frac{A_{\text{пн}}}{A} \right) \quad (8)$$

Обозначим

$$\varphi = 1 - \frac{A_{\text{пн}}}{A} \quad (9)$$

Тогда

$$A_p = \varphi A \quad (10)$$

Рассмотрим работу сил, приложенных к центру тяжести самолёта. Согласно авиационным правилам АП-23, пункт 23.473 (е), подъёмная сила крыла, не превышающая $2/3$ веса самолёта, имеет место в течение всего времени действия удара при посадке и проходит через центр тяжести.

Подъёмную силу крыла принимаем равной $2/3$ веса самолёта

$$Y = \frac{2}{3} mg \quad (11)$$

Пренебрегаем деформацией конструкции самолёта. Вертикальное перемещение центра тяжести самолёта в момент посадки считаем равным вертикальному обжатию амортизационной системы. В этом случае работа неразгруженной части веса самолёта равна

$$A_H = (mg - Y) h_a , \quad (12)$$

где

h_a — вертикальное обжатие амортизационной системы.

Подставим (11) в (12)

$$A_H = \frac{1}{3} mgh_a \quad (13)$$

Получим выражение работы, поглощаемой рессорами. Для этого используем закон сохранения энергии при посадке, который имеет следующий вид

$$A = K + A_H \quad (14)$$

Подставим (2) и (13) в (14), после простых преобразований получим

$$A = \psi mgh \quad (15)$$

где

$$\psi = 1 + \frac{1}{3} \frac{h}{h_a} \quad (16)$$

Подставим (15) в (10)

$$A_p = \varphi \psi mgh \quad (17)$$

Рассмотрим потенциальную энергию деформации одной рессоры. Она имеет следующее выражение

$$U_1 = \int_0^l \frac{M^2}{2EJ} dl \quad (18)$$

где

M — изгибающий момент;

E — модуль упругости;

J — момент инерции площади поперечного сечения рессоры;

l — длина рессоры.

Потенциальной энергией при сдвиге и кручении рессоры пренебрегаем ввиду малости.

Материал рессоры одинаковый, тогда имеем

$$U_1 = \frac{1}{2E} \int_0^l \frac{M^2}{J} dl \quad (19)$$

С целью перехода к напряжениям преобразуем подинтегральное выражение

$$\frac{M^2}{J} = \frac{M^2}{W^2} \frac{W^2}{J} \quad (20)$$

где W — момент сопротивления.

Максимальное нормальное напряжение в произвольном по длине рессоры поперечном сечении вычисляется по известной формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (21)$$

С учётом (21) формула (20) принимает вид

$$\frac{M^2}{J} = \sigma^2 \frac{W^2}{J} \quad (22)$$

Рассмотрим случай, когда рессора имеет сплошное прямоугольное поперечное сечение, для которого

$$W = \frac{b\delta^2}{6}; \quad J = \frac{b\delta^3}{12}, \quad (23)$$

где b – ширина поперечного сечения рессоры;

δ – высота поперечного сечения рессоры.

Подставим (23) в (22), после простых преобразований получим

$$\frac{M^2}{J} = \frac{\sigma^2 b \delta}{3} \quad (24)$$

Площадь поперечного сечения равна

$$F = b \delta \quad (25)$$

С учётом (25) формула (24) принимает вид

$$\frac{M^2}{J} = \frac{\sigma^2 F}{3} \quad (26)$$

Подставим (26) в (19)

$$U_1 = \frac{1}{6E} \int_0^l \sigma^2 F dl \quad (27)$$

Рассмотрим идеальную равнонапряжённую рессору, у которой максимальные нормальные напряжения постоянны по длине рессоры

$$\sigma = \text{const} \quad (28)$$

С учётом (28) формула (27) принимает вид

$$U_1 = \frac{\sigma^2}{6E} \int_0^l F dl \quad (29)$$

Интеграл есть объём одной рессоры. Тогда

$$U_1 = \frac{\sigma^2}{6E} V_1 \quad (30)$$

Считаем, что все рессоры одинаковые и загружены одинаково. В этом случае потенциальная энергия деформации всех рессор равна

$$U_p = n U_1 \quad (31)$$

где n — число одинаковых рессор.

Подставим (30) в (31)

$$U_p = \frac{\sigma^2}{6E} V_p \quad (32)$$

где

$$V_p = nV_1 \text{ — суммарный объём рессор.}$$

Представляет интерес величина средней удельной потенциальной энергии деформации идеальной равнонапряжённой рессоры. С учётом (32) она равна

$$a_p = \frac{U_p}{V_p} = \frac{\sigma^2}{6E} \quad (33)$$

Сравним эту величину с удельной потенциальной энергией растянутого стержня. Как известно, она равна

$$a = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (34)$$

Из сравнения (33) и (34) имеем

$$\frac{a_p}{a} = \frac{1}{3} \quad (35)$$

Отсюда следует, что при равных начальных условиях рессора, работающая на изгиб, в три раза тяжелее стержня, работающего на растяжение. Этот результат объясняется неравномерным распределением напряжений по высоте поперечного сечения рессоры.

Рессору считаем идеальным упругим телом, гистерезисом материала пренебрегаем. Для рессоры закон сохранения энергии имеет вид

$$A_p = U_p \quad (36)$$

Подставим (17) и (32) в (36)

$$\varphi\psi mgh = \frac{\sigma^2}{6E} V_p \quad (37)$$

Отсюда находим объём рессор

$$V_p = \frac{6\varphi\psi mghE}{\sigma^2} \quad (38)$$

Масса рессор равна

$$m_p = \rho V_p = \rho \frac{6\varphi\psi mghE}{\sigma^2} \quad (39)$$

где

ρ — массовая плотность материала рессор.

Перейдём к относительной массе рессор

$$\overline{m}_p = \frac{m_p}{m} = \rho \frac{6\varphi\psi ghE}{\sigma^2} \quad (40)$$

Считаем, что при эксплуатационной нагрузке напряжения в рессоре не превышают предела пропорциональности материала. Выразим максимальное напряжение через временное сопротивление.

$$\sigma = \frac{\sigma_B}{f} \quad (41)$$

где

f - коэффициент безопасности.

Подставим (41) в (40)

$$\overline{m}_p = \rho \frac{6\varphi\psi ghE}{\sigma_B^2} f^2 \quad (42)$$

Введём обозначение

$$H = \frac{\sigma_B^2}{\rho g E} \quad (43)$$

Нетрудно убедиться в том, что параметр **H** имеет размерность длины. Он зависит от характеристик материала.

С учётом принятого обозначения (43) формула относительной массы рессор (42) принимает вид

$$\overline{m}_p = 6\varphi\psi f^2 \frac{h}{H} \quad (44)$$

Для получения минимальной относительной массы рессор надо выбирать материал, у которого параметр **H** будет максимальный. В таблице 1 представлены результаты расчёта параметра **H** для некоторых конструкционных материалов. Следует отметить сильное влияние характеристик материала на параметр **H**.

Таблица 1

| Материал | σ_b МПа | E ГПа | ρ г/см ³ | H м |
|------------|-------------------|----------|-----------------------------|--------|
| 20ХГСН2МФА | 1350 | 210 | 7,85 | 110,5 |
| В95 | 540 | 72 | 2,8 | 144,6 |
| ВНС-65 | 1700 | 210 | 7,85 | 175,3 |
| ВКС-9 | 1950 | 210 | 7,85 | 230,7 |
| ВТ-22 | 1300 | 110 | 4,5 | 341,4 |

Для оценки влияния на массу рессор удельной нагрузки на крыло и механических характеристик материала рассмотрим следующий пример. Задаёмся

$$\varphi = 0,7; \quad \psi = 1,2; \quad f = 1,5 \quad (45)$$

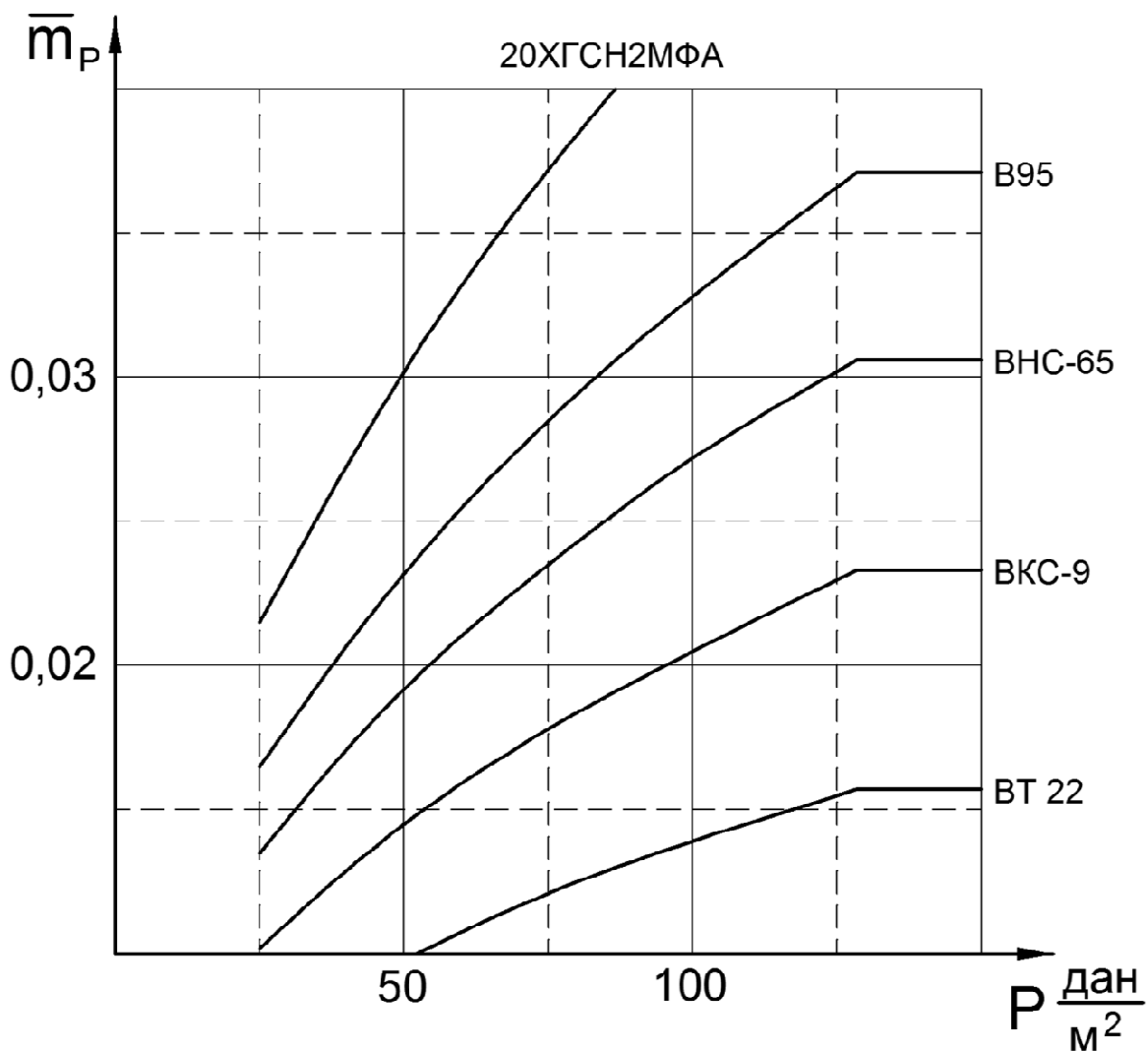


Рис. 1.

Подставим (5) и (45) в (44), после вычисления коэффициента получим

$$\overline{m}_p = 0,475 \frac{\sqrt{P}}{H} \quad (46)$$

По авиационным правилам АП-23, пункт 23.473 (d)(1), вертикальная скорость снижения при посадке ограничена

$$V_y \leq 3,05 \text{ м/сек} \quad (47)$$

С учётом (4) и (47) имеем следующее условие выполнения требования авиационных правил

$$0,9066\sqrt[4]{\sigma} \approx 3,05 \text{ м/сек} \quad (48)$$

Отсюда получаем

$$\sigma \approx 128 \text{ дан/м}^2 \quad (49)$$

При выполнении условия (49) можно пользоваться формулой (46). В противном случае относительная масса рессор не зависит от удельной нагрузки на крыло.

Результаты расчёта относительной массы рессор по формуле (46) для ряда металлов представлены на Рис.1. Величины N взяты из таблицы 1. Графики иллюстрируют сильное влияние материала на относительную массу рессор. Минимум массы обеспечивает высокопрочный титановый сплав. На начальном этапе проектирования лёгкого самолёта, когда выбирается удельная нагрузка на крыло, следует учитывать, что при выполнении условия (49) с уменьшением удельной нагрузки на крыло существенно снижается относительная масса рессор.

В заключение следует отметить, что полученные результаты могут быть использованы при разработке методики оценки массы рессорного шасси.

Библиографический список

- 1.Арепьев А.Н. Проектирование лёгких пассажирских самолётов. Издательство МАИ, М., 2006 г. 637с.
- 2.Рабинович И.М. Основы строительной механики стержневых систем. Госстройиздат, 1960 г.,519 с.