

УДК 621:891

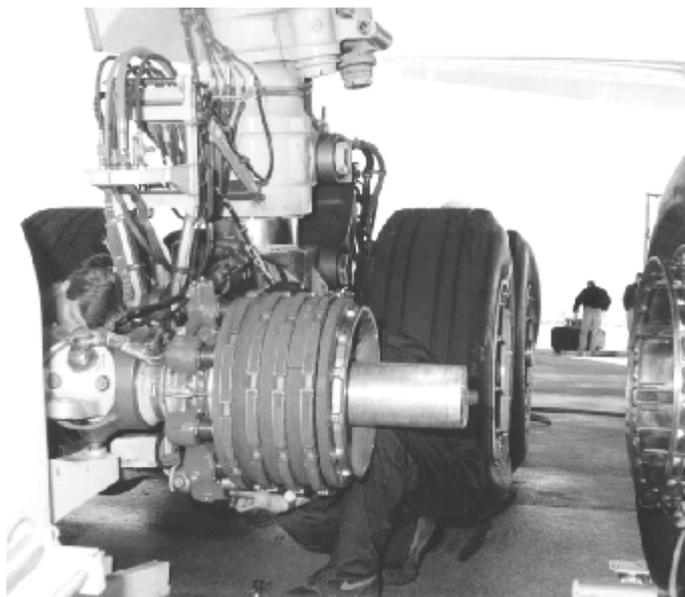
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОРМОЗОВ САМОЛЕТОВ

С.Б. АНФИНОГЕНОВ, В.А. БАЛАКИН

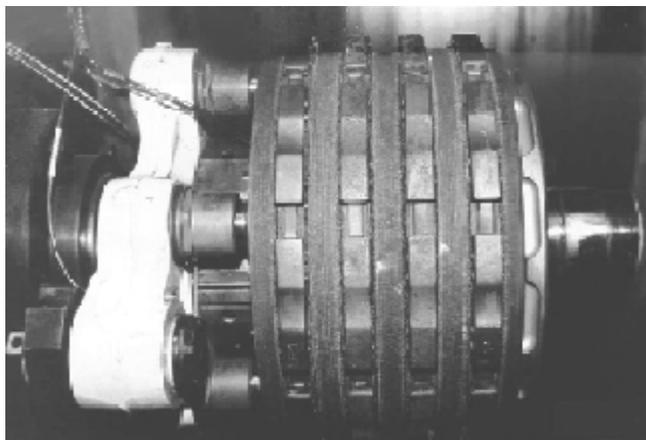
*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Современные самолёты в момент приземления имеют высокую посадочную скорость (до 260 км/ч) и обладают большой кинетической энергией (до 3000 МДж). До 95 % кинетической энергии при посадочном торможении воспринимают фрикционные тормоза. Конструкции тормозов бывают трёх типов: дисковые, дисково-колодочные и камерные. Наибольшее распространение в дальнемагистральных, среднемагистральных и ближнемагистральных самолётах (Боинг-777, Ил-96, МД-11, А-340-300, Ту-334, Боинг-737, Ту-154, Ан-24 и др.) получили многодисковые тормоза. Дисково-колодочными тормозами оборудованы шасси передних стоек ряда модификаций самолётов. Камерные тормоза применяются в самолётах для местных авиалиний (Ан-3, Ан-38 и др.). Фрикционные тормоза смонтированы в шасси главных ног самолётов, число которых достигает двенадцати (не считая шасси передних стоек). Количество фрикционных дисков в одном тормозе, например, в самолётах Боинг-767, Боинг-737 и Ту-154 равно пяти, эти диски с помощью шлицов установлены на ободе колеса, ещё четыре диска закреплены на неподвижных осях, связанных с корпусом самолёта. Общее количество фрикционных пар равно восьми (рис. 1, 2, 3). Таким образом, в торможении такого самолёта участвует 96 трущихся пар. Это позволяет эффективно поглощать теплоту трения.



а)



б)

Рис. 1. Тормоза самолёта Boeing-767: а – общий вид шасси главной ноги самолёта; б – тормоз колеса

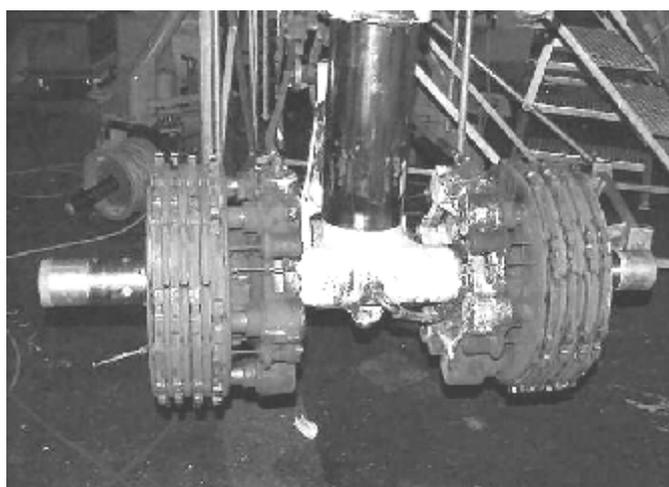


Рис. 2. Левый и правый тормоз главной ноги самолёта Boeing-737

Постановка задачи

Расчёт теплового режима работы тормозов будет проводиться для случаев посадки самолётов:

- Ту-154 ($m = 80000$ кг, $v_0 = 200$ км/ч, $S_T = 1000$ м);
- Ан-24 ($m = 21000$ кг, $v_0 = 180$ км/ч, $S_T = 700$ м);
- Ан-3 ($m = 5000$ кг, $v_0 = 110$ км/ч, $S_T = 200$ м).

Теплофизические свойства фрикционных накладок и металлического диска равны:

$$\lambda_1 = 0,64 \text{ Вт/мК}, \quad c_1 = 837 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad \rho_1 = 2200 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_2 = 0,30 \text{ Вт/мК}, \quad c_2 = 540 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad \rho_2 = 7700 \text{ кг/м}^3.$$

(Данные по фрикционным материалам, взяты для ретинакса 16Л и чугуна СЧ20 соответственно.)

Необходимо рассчитать средние приращения температур.

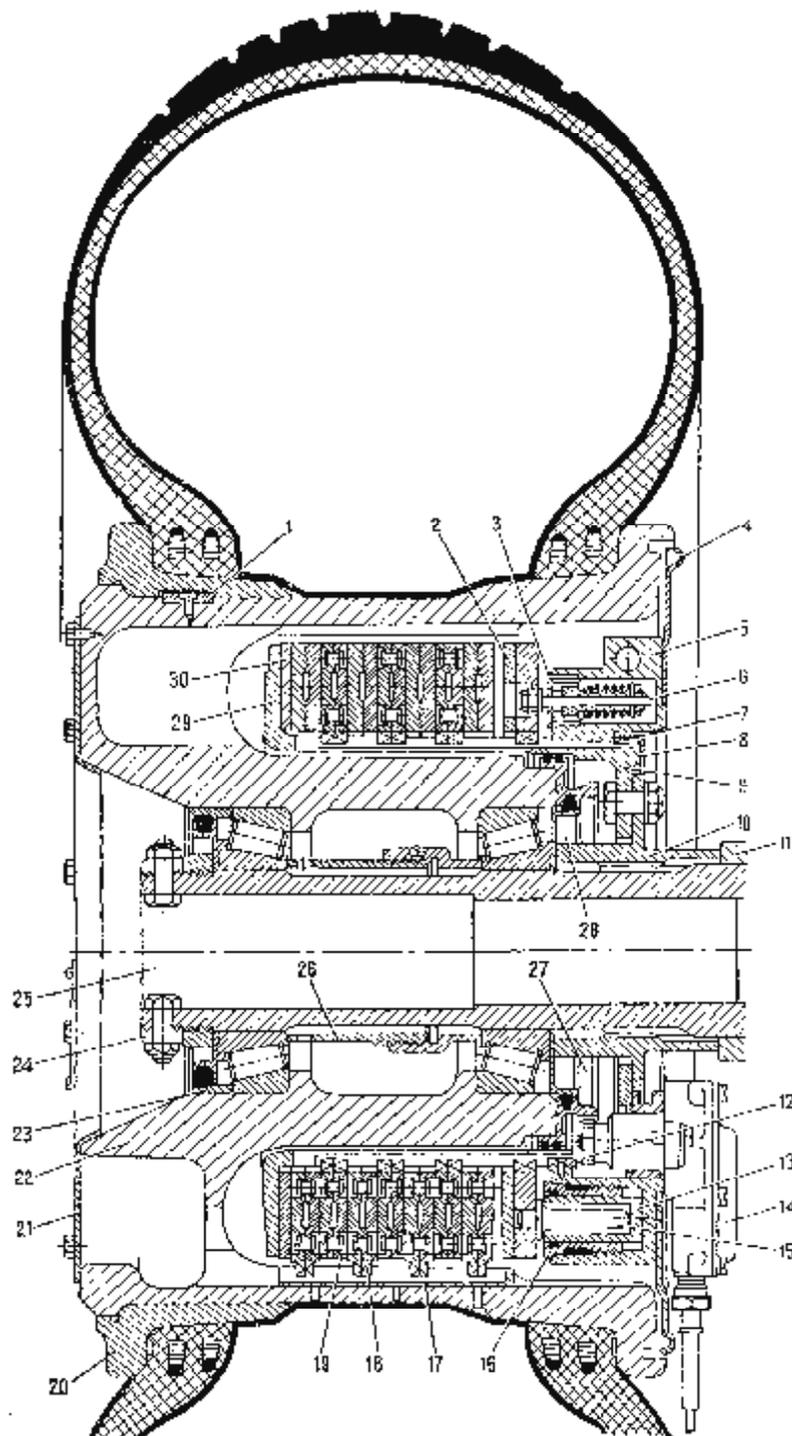


Рис. 3. Тормозное колесо: 1 – шпонка; 2 – нажимной диск; 3 – крышка регулятора зазора; 4 – внутренний щит; 5 – блок цилиндров; 6 – регулятор зазора; 7 – стопорное кольцо; 8 – колпак; 9 – корпус тормоза; 10 – тормозной фланец; 11 – головка штока амортизационной стойки; 12 – сухарь; 13 – поршень; 14 – инерционный датчик УА27М; 15 – стержень; 16 – гильза; 17 – направляющая; 18 – промежуточный диск; 19 – биметаллический диск; 20 – наружный борт барабана; 21 – наружный щит; 22 – барабан колеса; 23 – кольцо (обтюратор); 24 – гайка; 25 – ось; 26 – распорная втулка; 27 – шестерня привода инерционного датчика; 28 – колпачок; 29 – опорный фланец; 30 – биметаллический сектор

Теоретическая часть

На рис. 4 рассмотрены процессы тепловыделения и теплопереноса в тормозе.

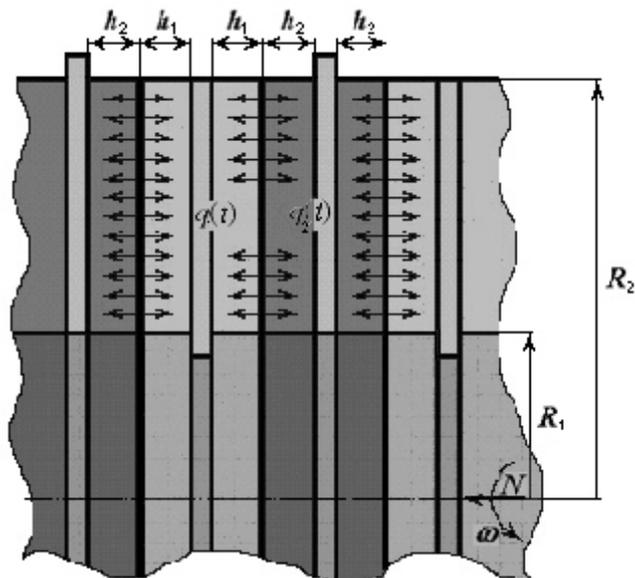


Рис. 4. Тепловая схема многодискового тормоза

Считая торможение равнозамедленным, полное время торможения определяется по формуле:

$$t_T = \frac{2S_T}{v_0}. \quad (1)$$

Кинетическая энергия движущегося со скоростью v_0 самолёта равна

$$W = \frac{mv_0^2}{2}. \quad (2)$$

Если пренебречь сопротивлением воздуха и кинетической энергией вращающихся масс (колес, валов, зубчатых передач и т. п.), то при торможении каждый тормоз поглощает кинетическую энергию, пропорциональную нагрузке на ось колеса.

Для самолётов (Боинг-777, Боинг-737 и Ту-154) в первом приближении (без учета сил инерции) каждый тормоз поглощает кинетическую энергию равную

$$W_T = \frac{W}{12}. \quad (3)$$

Эта энергия в виде теплоты выделяется в зонах контакта фрикционная накладка–диск.

Так как в каждом тормозе таких самолётов общее количество фрикционных пар равно восьми, то кинетическая энергия, приходящаяся на одну фрикционную пару, равна

$$W_1 = \frac{W_T}{8} = \frac{mv_0^2}{192}. \quad (4)$$

Среднюю интенсивность фрикционного тепловыделения определяем по формуле

$$q_{cp} = \frac{W_1}{Aa_1 t_T}, \quad (5)$$

где Aa_1 – номинальная площадь касания дисков, $Aa_1 = \pi(R_2^2 - R_1^2)$.

Тогда начальная интенсивность фрикционного тепловыделения

$$q_0 = 2q_{cp} = \frac{mv_0^3}{192Aa_1S_T}. \quad (6)$$

Приращение температуры на поверхности трения диска (барабана) определяется зависимостью [1-4]:

$$\vartheta(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{(1 - \alpha_T)q_0 K_{\epsilon_3} h_2}{\lambda_2} \Theta'_2(\eta_2, Fo_2) - \frac{(1 - \alpha_T)q_0 K_{\epsilon_3} h_2^3}{t_T \lambda_2 a_2} \Theta''_2(\eta_2, Fo_2), \quad (7)$$

$$\text{где } \alpha_T = \frac{K_{\epsilon_3} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{K_{\epsilon_3} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}},$$

$$\Theta'_2(\eta_2, Fo_2) = Fo_2 - \eta_2 + \frac{\eta_2}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \exp(-\mu_n^2 Fo_2) \cos[\mu_n(1 - \eta_2)]. \quad (8)$$

$$Fo_2 = \frac{a_2 t}{h_2^2}, \quad \mu_n = n\pi, \quad A'_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2}, \quad a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}, \quad K_{\epsilon_3} = \frac{Aa_1}{Aa_2},$$

$$\Theta''_2(\eta_2, Fo_2) = \frac{Fo_2^2}{2} + \frac{Fo_2}{3} + \frac{Fo_2 \eta_2^2}{2} - Fo_2 \eta_2 + \frac{\eta_2^4}{24} - \frac{\eta_2^3}{6} - \frac{\eta_2^2}{6} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \exp(-\mu_n^2 Fo_2) \cos[\mu_n(1 - \eta_2)], \quad (9)$$

$$A''_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^4}.$$

Функции $\Theta'_2(\eta_2, Fo_2)$, $\Theta''_2(\eta_2, Fo_2)$ зависят от безразмерной координаты $\eta_2 = \frac{z_2}{h_2}$ и безразмерного времени – числа Фурье (Fo_2).

На поверхности трения $\eta_2 = 0$.

Средние приращения температур на поверхности трения диска (барабана) определяется как

$$\vartheta(0, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{(1 - \alpha_T)q_0 K_{\epsilon_3} h_2}{\lambda_2} \Theta'_2(0, Fo_2) - \frac{(1 - \alpha_T)q_0 K_{\epsilon_3} h_2^3}{t_T \lambda_2 a_2} \Theta''_2(0, Fo_2). \quad (10)$$

При числах Фурье $Fo_2 \geq 0,5$ ряды в формулах (8) и (9) сходятся к нулю, тогда

$$\Theta'_2(0, Fo_2) = Fo_2 + \frac{1}{3}, \quad (11)$$

$$\Theta''_2(0, Fo_2) = \frac{Fo_2^2}{2} + \frac{Fo_2}{3} - \frac{1}{45}. \quad (12)$$

Результаты расчёта и их обсуждение

В таблице приведены исходные параметры самолётов, а также основные расчётные данные.

Таблица

Сравнительные характеристики исходных параметров исследуемых самолётов и основных результатов расчета их тормозов

| Параметры | Тип самолёта | | |
|---|--------------|-------|-------|
| | Ту-154 | Ан-24 | Ан-3 |
| $m, \text{Т}$ | 80 | 21 | 5 |
| $v_0, \text{км/ч}$ | 200 | 180 | 110 |
| $S_T, \text{м}$ | 1000 | 700 | 200 |
| $t_T, \text{с}$ | 36 | 28 | 13 |
| $Aa_1, \text{м}^2$ | 0,190 | 0,131 | 0,110 |
| $Aa_2, \text{м}^2$ | 0,190 | 0,131 | 0,053 |
| $h, \text{м}$ | 0,004 | 0,004 | 0,006 |
| $K_{\text{вз}}$ | 1,0 | 1,0 | 0,477 |
| $W, \text{МДж}$ | 124,0 | 26,3 | 2,3 |
| $W_T, \text{МДж}$ | 10,3 | 6,6 | 1,2 |
| $W_1, \text{МДж}$ | 1,29 | 0,82 | 0,58 |
| $q_0, \text{МВт/м}^2$ | 0,38 | 0,45 | 0,81 |
| α_T | 0,089 | 0,089 | 0,044 |
| $[\mathcal{G}(0, Fo_2) - \mathcal{G}_0]_{\text{max}}$ | 372 | 344 | 99 |

На рис. 5 приведены зависимости приращений температур поверхностей трения в процессе торможения от времени.

В тормозах самолёта Ан-3 максимальные приращения температуры $[\mathcal{G}(0, Fo_2) - \mathcal{G}_0]_{\text{max}} = 99 \text{ К}$, возникает на 11 секунде торможения, в самолёте Ан-24 – 344 К, на 27 секунде торможения, в самолёте Ту-154 – 372 К, на 35 секунде торможения.

приращение температуры $\mathcal{G}(0, Fo) - \mathcal{G}_0$, К

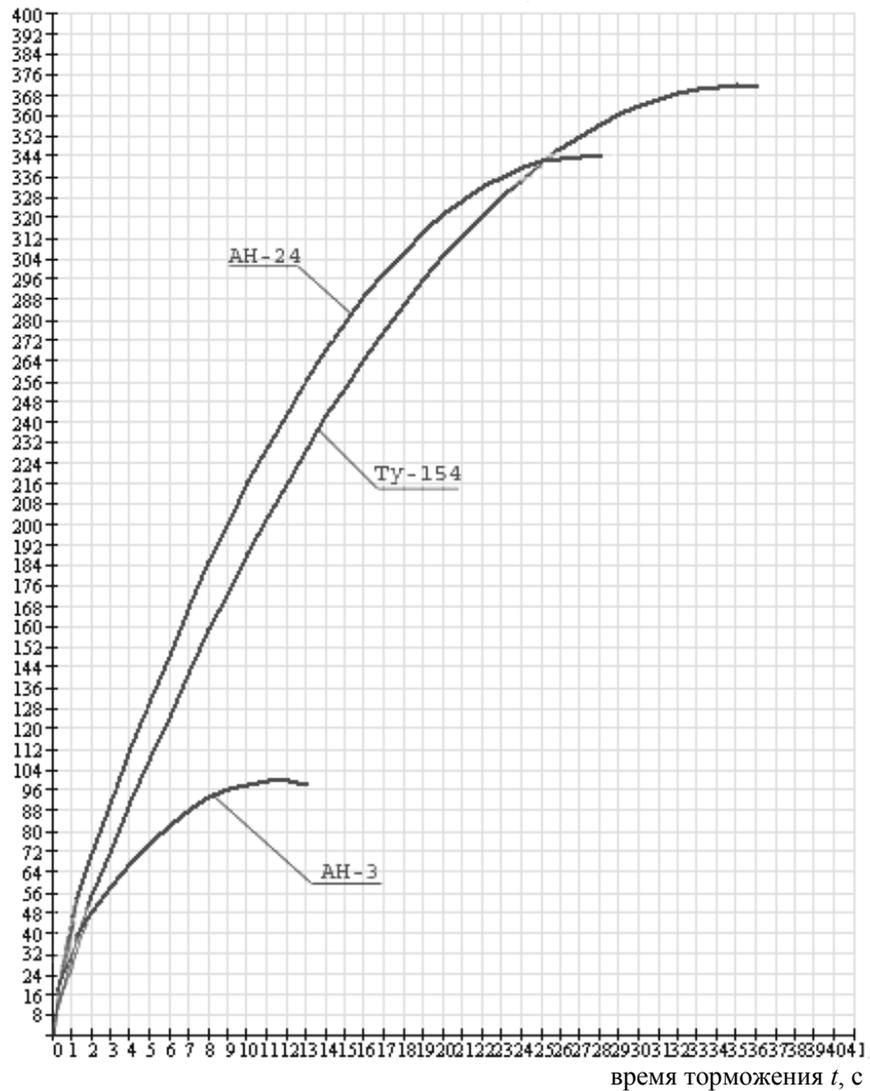


Рис. 5. График зависимостей приращения температур поверхностей трения в процессе торможения от времени

Выводы

Средние расчётные значения температур в тормозах самолётов Ту-154 и Ан-24 при торможении достигают 372 К и 344 К соответственно. Максимальные контактные температуры, учитывающие температуры вспышек, обычно бывают выше на 25–30 %. Таким образом, методика теплового расчёта, разработанная на кафедре «Сельскохозяйственные машины», оказалась применима не только к тормозам автомобилей, тракторов, железнодорожного подвижного состава [1-4], но и к тормозам самолётов.

Обозначения

m – полная масса; t_T – полное время торможения; \mathcal{G} – температура; \mathcal{G}_0 – начальная температура; v_0 – начальная скорость торможения самолёта; $z_{1,2}$ – координаты на нормали к поверхности фрикционного элемента и диска (барабана) соответственно; S_T – тормозной путь; $q_{ср}$ – средняя интенсивность тепловыделения; q_0 – начальная интенсивность тепловыделения; q_1, q_2 – тепловые потоки в фрикционную накладку и диск (барабан); α_T – коэффициент распределения тепловых потоков; $K_{\text{вз}}$ –

коэффициент взаимного перекрытия; Fo_2 – число Фурье; Aa_1, Aa_2 – номинальные площади контакта тела и контртела; $\lambda_{1,2}, c_{1,2}, \rho_{1,2}, a_{1,2}$ – теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность фрикционного элемента и диска (барабана) соответственно; $h_{1,2}$ – полутолщина диска (толщина барабана); φ – коэффициент сцепления; W – кинетическая энергия самолёта; W_T – кинетическая энергия, приходящаяся на один тормоз; W_1 – кинетическая энергия, поглощаемая одной фрикционной парой.

Литература

1. Балакин В.А. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения /В.А. Балакин, В.П. Сергиенко //ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 1999.
2. Балакин В.А., Сергиенко В.П. Тепловые расчеты тормозов легковых автомобилей //Трение и износ. – 1999. – Т. 20, № 3.
3. Сравнительный анализ тормозов грузовых автомобилей /В.А. Балакин, и др. //Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2.
4. Балакин В.А., Галай Э.И. Тепловой режим железнодорожного фрикционного тормоза большой мощности в переходном периоде нарастания тормозной силы //Трение и износ. – 1999. – Т. 20, № 2.

Получено 21.07.2004 г.