

Влияние перфорации тормозных дисков на их температуру в условиях взлета и посадки

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

Одним из условий безопасности авиационных перевозок является обеспечение высокой надежности тормозных систем, среди которых важное место занимают дисковые тормоза колес основных опор шасси. Их проектирование и доводка невозможны без использования современных методов расчета. Однако из-за сложности математического описания процесса теплообмена при торможении моделирование температурных полей в деталях тормоза связано с большими трудностями. С учетом этого в работе предложена конечно-элементная модель, на основе которой исследовано влияние перфорации тормозных дисков в виде цилиндрических отверстий на их температуру для самолета со взлетной массой 50 т.

Ключевые слова: дисковый тормоз, температура диска при торможении, конечноэлементная модель оценки температуры.

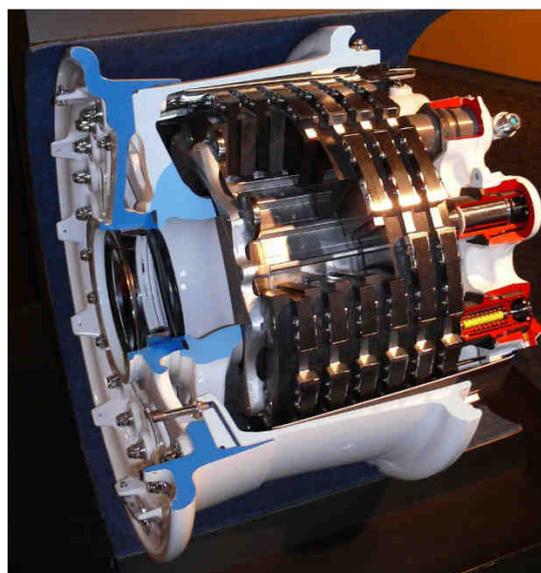
Введение

Торможение современных скоростных и тяжелых самолетов на пробеге после посадки – одна из острых проблем при решении задач сокращения длины взлетно-посадочной полосы аэродрома.

Тормоза, расположенные в колесах шасси, кроме основного предназначения, обеспечивают маневрирование самолёта на аэродроме и его фиксацию при максимальной тяге двигателей перед взлетом [1]. После посадки кинетическая энергия самолёта, обусловленная поступательной скоростью, переходит в работу, затрачиваемую на преодоление сил аэродинамического сопротивления и сил трения, возникающих при торможении колёс.



а



б

Рис. 1. Стойка шасси с тормозными колесами (а), барабан колеса и дисковый тормозной пакет (б)

Различают три типа самолетных тормозов — колодочные, камерные и дисковые. Наиболее широкое распространение в конструкциях современных авиационных колес получили дисковые тормоза (рис. 1).

Дисковые тормоза действуют по принципу фрикционной муфты сцепления. На барабане и корпусе тормоза укреплены вращающиеся вместе с колесом и неподвижные тормозные диски. Диски перемещаются вдоль оси колеса. Тормозной эффект достигается тем, что вращающиеся диски прижимаются к неподвижным. Дисковые тормоза компактны, создают большой тормозной момент, работают плавно, без заклинивания, не требуют точной концентричности колеса и барабана.

Механическая часть дискового тормоза состоит из подвижных (диска тормоза) и неподвижных (башмака и колодки с накладками) деталей. При торможении они приводятся в соприкосновение. В результате совершения работы сил трения в зоне фрикционного контакта происходит интенсивное выделение тепла. Его большая часть отводится в детали тормоза, вследствие чего при длительном и непрерывном торможении возможен перегрев всех деталей тормоза [2].

С учетом этого весьма важен является выбор материала тормозных дисков. Их характеристики приведены в таблице.

Сравнение материалов тормозных дисков по температурным условиям [1]

Свойства	Углерод	Бериллий	Сталь	Требуемый показатель
Плотность, фунт/дюйм ³	0,061	0,066	2,283	Высокая
Теплоемкость при температуре 500°F, (Btu/фунт) °F	0,31	0,56	0,13	Высокая
Теплопроводность при температуре 500°F	100	75	24	Высокая
Термическое расширение при температуре 500°F · 10 ⁶ дюйм/дюйм/°F	1,5	6,4	8,4	Низкое
Коэффициент сопротивления термическому удару 10 ⁵	141	2,7	5,5	Высокий
Предельная температура, °F	4000	1700	2100	Высокая

Как видим, температурные факторы являются определяющими при конструировании дисков тормозных колес.

1. Постановка задачи исследований

В настоящее время существуют упрощенные математические модели, описывающие температурные условия в отдельных деталях дискового тормоза. В соответствии с этими моделями принято, что температурное поле детали обладает угловой симметрией, а долю тепла, отводимого каждой деталью тормоза, учитывают с помощью коэффициента распределения тепловых потоков. Этот коэффициент определяется эмпирическим путем. От точности его определения зависит точность результатов расчета.

Следует также отметить, что предлагаемые модели можно использовать только для поверочных расчетов без учета геометрических особенностей тормозных дисков.

Вследствие этого задачей данного исследования является разработка модели оценки температурного поля на тормозных дисках с минимальными упрощениями и с учетом перфорации тормозных дисков, что позволяет увеличить теплоотвод с их поверхности.

2. Решение задачи

При торможении работа трения обращается в тепло, которое и вызывает нагрев дисков и тормозного барабана. Заторможенное колесо на пробеге создает большое трение, зависящее от состояния посадочной поверхности. Момент силы трения M_f относительно оси колеса уравнивается приложенным к колесу тормозным моментом $M_{тор}$, т.е.

$$M_f = r \cdot M_{тор}, \quad (1)$$

где r – радиус колеса с учетом обжатия пневматика.

Сила трения F определяется уравнением

$$F = \mu \cdot P_{кол}, \quad (2)$$

где $P_{кол}$ – нормальная сила, приложенная к колесу; μ – коэффициент трения.

Для проведения анализа тормозной системы разработана виртуальная сборка стойки шасси и ее дискового тормоза (рис. 1).

Ориентировочные значения коэффициента распределения тепловых потоков известны только для некоторых конструкций колодочного тормоза. Для дисковых тормозов таких данных нет.

Большая неопределенность при выборе граничных условий и, следовательно, низкая достоверность расчета значений температур – еще не главный недостаток таких моделей. С ним можно было бы мириться при проведении многовариантных расчетов в целях оптимизации конструкции тормоза. Однако модели, основанные на предположении об угловой симметрии полей температур, дают качественно неправильную картину их распределения в теле детали. Этот недостаток намного серьезнее. Его причина – некорректная постановка задачи.

Действительно, можно предположить, что геометрическая форма вращающихся деталей тормозов обладает угловой симметрией. Однако этого еще недостаточно для того, чтобы можно было использовать осесимметричную модель для их расчета. Необходимо, чтобы и нагрузки, действующие на деталь, обладали этим свойством, но это условие не выполняется.

В свою очередь, интенсивность тепловыделения в зоне фрикционного контакта q пропорциональна давлению p на поверхности контакта:

$$q = f \cdot \gamma \cdot p, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения;

γ – относительная скорость скольжения трущихся поверхностей.

Игнорирование конвективного переноса тепла как одного из наиболее существенных физических процессов, происходящих при торможении, является главной причиной неадекватности математических моделей, используемых в настоящее время при расчете температур в деталях тормоза. Конвективный перенос тепла обусловлен вращением деталей тормоза. Для его моделирования

необходимо использовать уравнение нестационарной теплопроводности в движущейся среде [3]:

$$c \cdot \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \gamma \cdot \text{grad} T \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + Q, \quad (4)$$

где T – температура;

t – время;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность материала;

γ – скорость движения среды;

λ – матрица теплопроводности (в общем случае тензор второго ранга);

Q – мощность внутренних источников тепла;

div и grad – соответственно дивергенция и градиент.

Решение уравнения (4) возможно только численными методами, среди которых наибольшей популярностью пользуется метод конечных элементов (МКЭ).

Эта известная проблема заключается в том, что в результате конечноэлементной дискретизации уравнения (4) получается очень жесткая система обыкновенных дифференциальных уравнений. По этой причине для решения нестационарных задач с быстро меняющимися краевыми условиями необходимо применять специальные методы. Обычно они строятся на основе неявных многостадийных схем Рунге-Кутты второго [4] и третьего порядков точности. Такие методы обладают свойствами А- и L-устойчивости и позволяют получать решение уравнения (4) с высокой точностью, но при их использовании приходится выполнять большой объем вычислений. Поэтому при разработке специализированного комплекса программ для моделирования распределения температур в дисковом тормозе большое внимание было уделено вопросу повышения эффективности реализации МКЭ в трехмерной постановке.

МКЭ применен для решения реальной задачи, в частности для оценки температурного поля в тормозных дисках. Существенным преимуществом метода есть то, что он дает возможность уточнить расчетную картину путем разбиения сетки на более мелкие участки. Это осуществляется для более точного анализа в тех местах, где ожидается изменение воздействия каких-либо факторов (приложение нагрузки, граница раздела материала и т. д.) для более детального описания расчетной картины.

Расчет проводился для двух вариантов дискового тормоза (переднее и заднее шасси). Диск выполнен из стали марки 20Х13. Его параметры: толщина – 25 мм; внутренний диаметр – 160 мм; наружный диаметр – 288 мм. Торможение осуществляется путем прижатия к двум торцевым поверхностям диска башмаков с тормозными колодками.

Один из наиболее эффективных путей снижения объема вычислений при реализации трехмерных моделей заключается в применении конечных элементов высоких порядков точности [4]. Однако в практике расчетов эти элементы используются сравнительно редко, а главное – крайне неэффективно. Это объясняется тем, что существующие реализации МКЭ, в том числе и ставшие индустриальными стандартами (ANSYS, CosmosM), предоставляют своим пользователям очень ограниченный выбор элементов высоких порядков точности. Как правило, это элементы второго порядка точности. Расчетная модель, схема нагружения и разбиение модели методом конечных элементов показаны на рис. 2, расчет проводился в программном комплексе ANSYS Workbench 14.5.

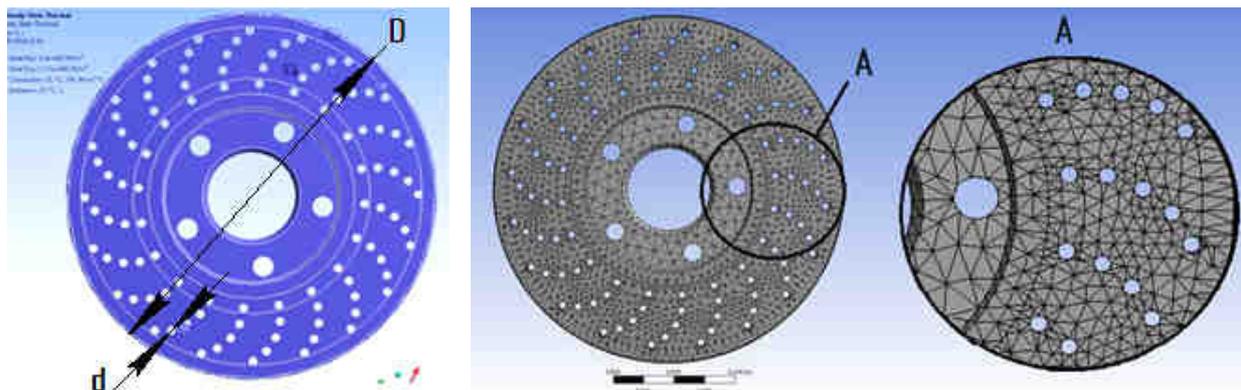


Рис. 2. Расчетная модель и схема разбиения поверхности диска на конечные элементы

Следует подчеркнуть, что основное конструктивное отличие дисков заключалось в варьировании в них сквозных отверстий, назначение которых заключалось в отводе тепла от теплонагретых поверхностей. Диаметр этих отверстий (d) в различных конструкциях составлял 9; 7; 5; 4; 4,5; 3 и 3,5 мм.

Оценочные результаты распределения температур и удельного теплового потока для диска с $d=5$ мм показаны на рис. 3.

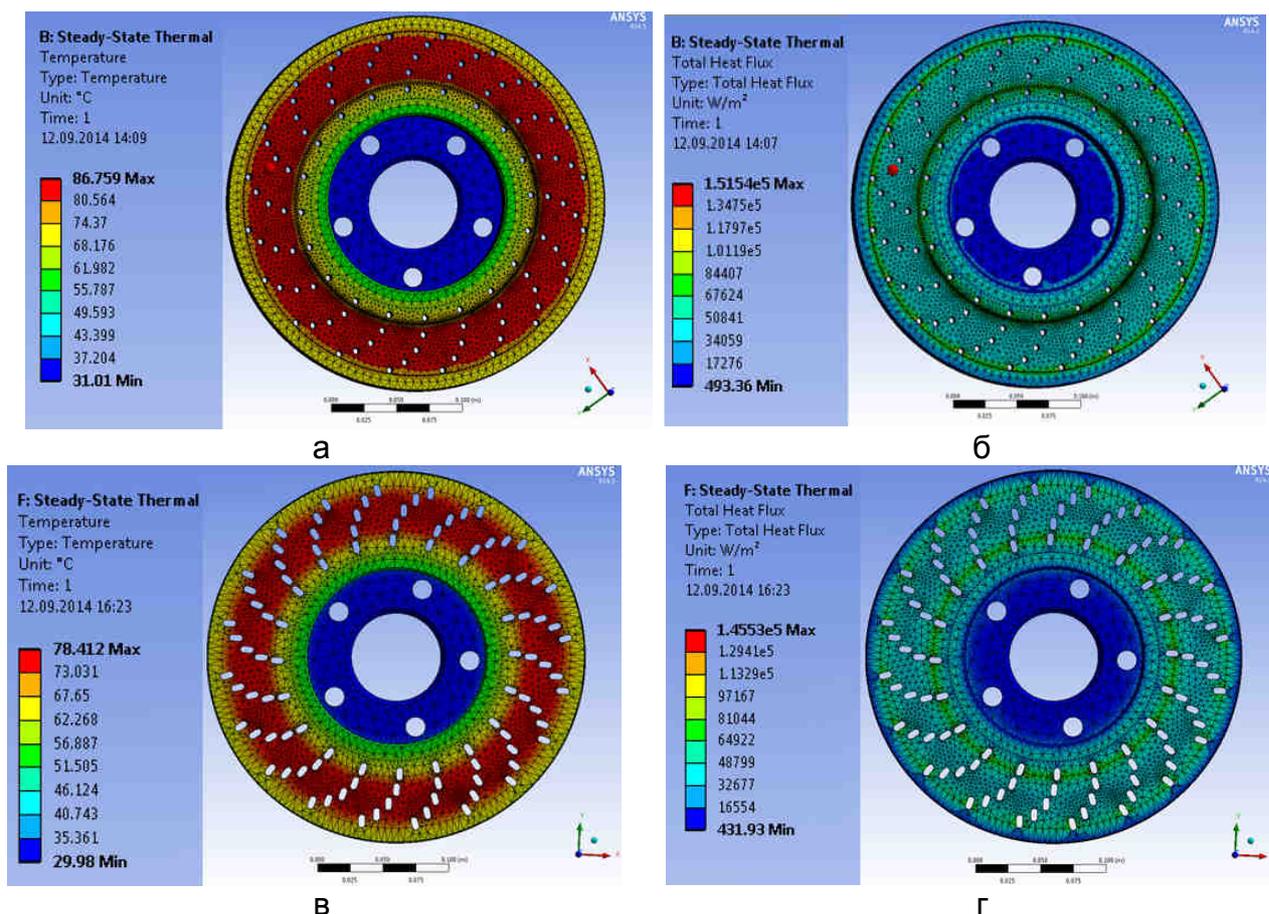


Рис. 3. Результаты расчета тормозного диска с диаметром отверстий 5 мм:
 а – распределение температуры; б – полный удельный тепловой поток;
 результаты расчета тормозного диска с диаметром отверстий 5 мм и межцентровым расстоянием 4,5 мм: в – распределение температуры; г – полный удельный тепловой поток

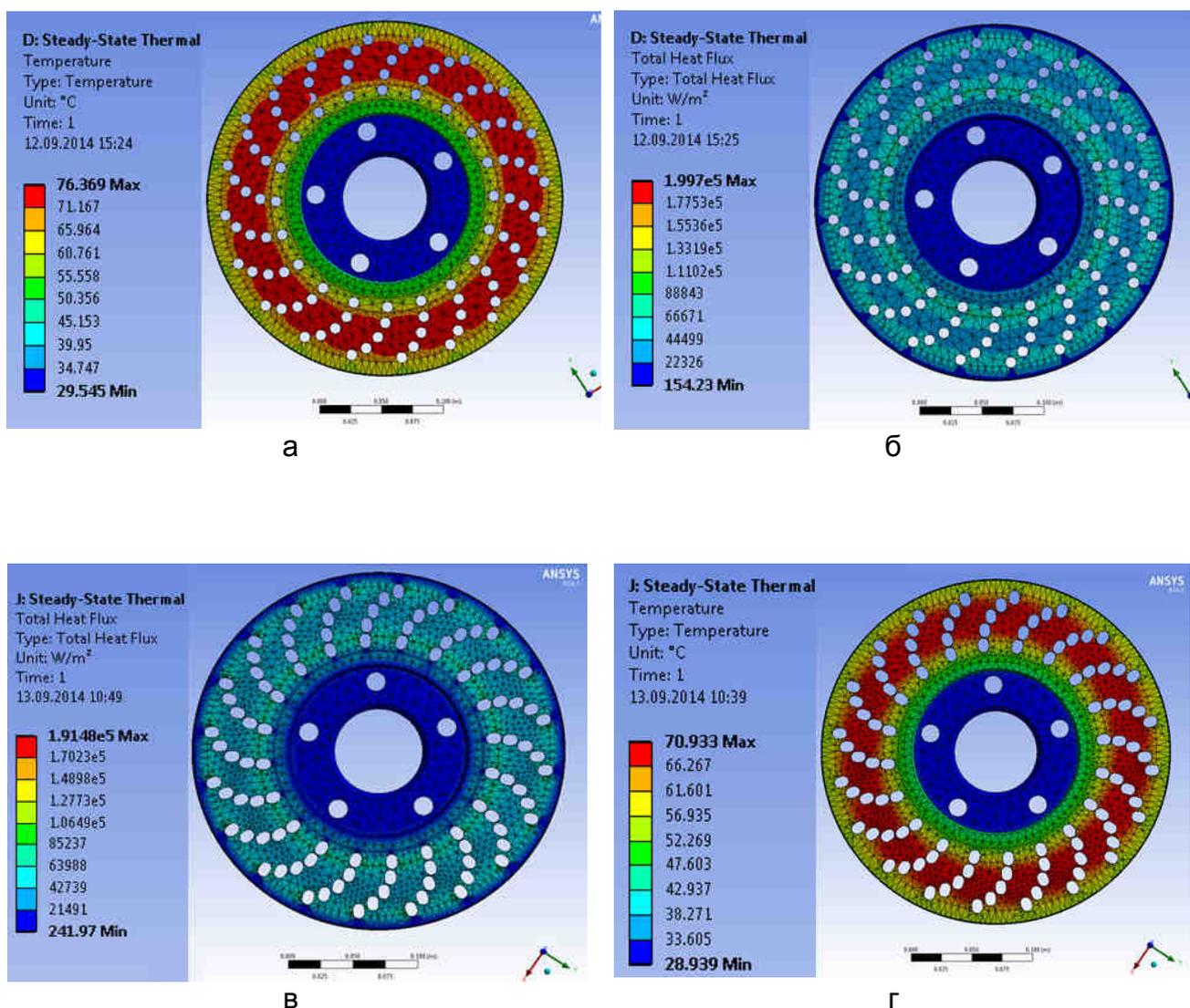


Рис. 4. Результаты расчета тормозного диска с диаметрам отверстий 9 мм:
 а – распределение температуры; б – полный удельный тепловой поток;
 результаты расчета тормозного диска с диаметром отверстий 9 мм и
 межцентровым расстоянием 3 мм: в – распределение температуры; г – полный
 удельный тепловой поток

На рис. 4 показаны результаты расчетов распределения температур и удельного теплового потока в дисках с отверстиями $d=9$ мм (а, б) и (в, г) при межцентровом расстоянии 3 мм.

Обобщенные данные о влиянии перфорирующих отверстий в тормозном диске на изменение температуры приведены на рис. 5.

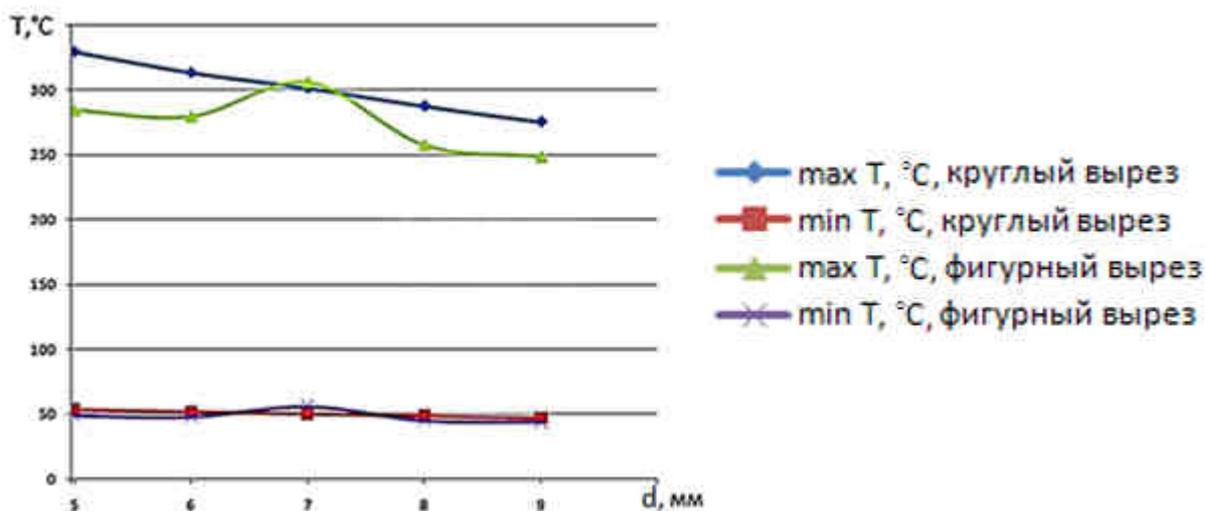


Рис. 5. Изменение максимальной и минимальной температур в зависимости от диаметра и формы отверстий в тормозном диске

Выводы

1. Для оценки температурных полей в тормозных дисках авиационного колеса использовано уравнение нестационарной теплопроводности в движущейся среде, решаемое методом конечного элемента в трехмерной постановке.

2. На основе такого подхода проведен тепловой расчет тормозных дисков с двумя вариантами перфорации, получены данные о распределении температуры и полного удельного теплового потока.

3. Установлено, что значительное влияние на температуру оказывает площадь контакта, время торможения, а также геометрические параметры перфорированных отверстий в тормозном диске.

Увеличение диаметра отверстий и изменение их геометрии приводят к снижению температуры нагрева диска. При этом площадь теплоотдачи выше, чем у диска без отверстий.

Для диска с отверстиями диаметром 5 мм температура составляет $329,29^{\circ}\text{C}$, что на 19,52% выше, чем у диска с отверстиями диаметром 9 мм. Проведены исследования для типоразмеров, которые не приводят к потере прочности конструкции. Критичный размер отверстия составляет 9,65 мм (тепловой расчет проводили в диапазоне с 5 до 9 мм).

Вторая форма перфорации тормозного диска обладает лучшими характеристиками по теплоотдаче, чем первая. Отверстия выполнены фигурно, диаметры отверстий – от 5 до 9 мм, межцентровые расстояния – от 4,5 до 3 мм. Различные межцентровые расстояния необходимы, чтобы обеспечить достаточную прочность диска.

Максимальная температура достигнута у диска диаметром 7 мм и межцентровым расстоянием 4 мм, что на 23,12% выше температуры диска диаметром 9 мм и межцентровым расстоянием 3 мм.

Разработанная методика позволяет на качественно новом уровне проводить исследование теплового состояния деталей тормозных дисков. Она свободна от допущений, которые делают неадекватными существующие методики расчета этих деталей на этапах взлета и посадки самолета.

Список литературы

1. Рябков, В. И. Проектирование шасси самолетов [Текст] / В. И. Рябков, В. А. Трофимов, В. М. Павленко и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 340 с.
2. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача [Текст] / А. А. Самарский, П. Н. Вабишевич. – М.: Единоурал, 2003. – 784 с.
3. Исполов, Ю. Г. Конечноэлементный анализ нестационарных полей в деталях [Текст] / Ю. Г. Исполов, Н. Н. Шабров. – М.: Проблемы прочности, 1989. – 354 с.
4. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
5. <http://cyberleninka.ru/article/n/teplovoy-raschet-tormozov-samoletov#ixzz39sAGjtYZ>.

Поступила в редакцию 24.11.2015

Вплив перфорації гальмівних дисків в умовах зльоту і посадки

Однією з умов безпеки авіаційних перевезень є забезпечення високої надійності гальмівних систем, серед яких важливе місце займають дискові гальма основних опор шасі. Їх проектування та доведення неможливі без використання сучасних методів розрахунку. Однак через складність математичного опису процесу теплообміну при гальмуванні моделювання температурних полів у деталях гальма пов'язано з великими труднощами. З урахуванням цього запропоновано скінченноелементну модель, на основі якої досліджено вплив перфорації гальмівних дисків у вигляді циліндричних отворів на їх температуру для літака із злітною масою 50 т.

Ключові слова: дискове гальмо, температура диска при гальмуванні, скінченноелементна модель оцінки температури.

Influence of the Brake Disk Punch on their Temperature under Takeoff and Landing Conditions

One of the conditions of air transportation safety is to ensure high reliability of brake systems, among which disc brakes of the main landing gear wheels are of great importance. Their design and debugging is impossible without using of modern methods of calculation. However due to the complexity of the mathematical description of the process of heat transfer when braking simulation of temperature field in brake parts is very difficult. With this in mind, the paper proposes a finite element model, on the base of which the influence of the perforation of brake disks in the form of cylindrical holes on their temperature for aircraft with takeoff weight of 50 tons has been searched.

Keywords: disc brake, temperature of disc during braking, a finite element model of the temperature estimate.