

УДК 621.891

А. И. ВОЛЬЧЕНКО¹, М. В. КИНДРАЧУК², И. О. БЕКИШ¹, В. Я. МАЛЫК¹,
В. И. ШУРНИКОВ¹

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

²Национальный авиационный университет, Украина

ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБОДАХ ТОРМОЗНЫХ БАРАБАНОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В материалах статьи произведена оценка термических напряжений в ободах тормозных барабанов (автотранспортных средств), исходя из их конструктивных и теплофизических параметров, а также механических свойств материалов.

Ключевые слова: барабанно-колодочный тормоз, тормозной барабан с ободом и боковой стенкой, конструктивные и теплофизические параметры, механические свойства материалов барабанов.

Введение. Явления, происходящие при разрушении рабочей поверхности обода тормозного барабана автотранспортного средства при электротермомеханическом трении под действием генерируемых электрических токов и аккумулируемых тепловых токов импульсного и длительного характера в зависимости от режимов торможения, рекомендуемых ЕЭК ООН [1] приводят поверхностные слои пар трения тормоза к неравновесной трибологии. Последняя в значительной степени зависит от поверхностных и объемных градиентов обода тормозного барабана, и как следствие, возникающих в нем термических напряжений.

Состояние проблемы. Тормозная колодка с фрикционными накладками и тормозным барабаном являются энергонагруженной системой, в которой энергоемким узлом является тормозной барабан. На рис. 1, а представлены изотермы (в °С) по сечению чугунного тормозного барабана заднего тормоза автобуса семейства ЛАЗ в конце 12-ти минутного нагружения его пар трения полученные электро моделированием [2]. При значительной неравномерности распределения температур по ширине обода 1 барабана 3 температура по его толщине изменяется мало. Что касается фланца 2 тормозного барабана 3, то в него происходит сток теплоты и в нем температуры намного ниже, чем в ободу 1 барабана 3.

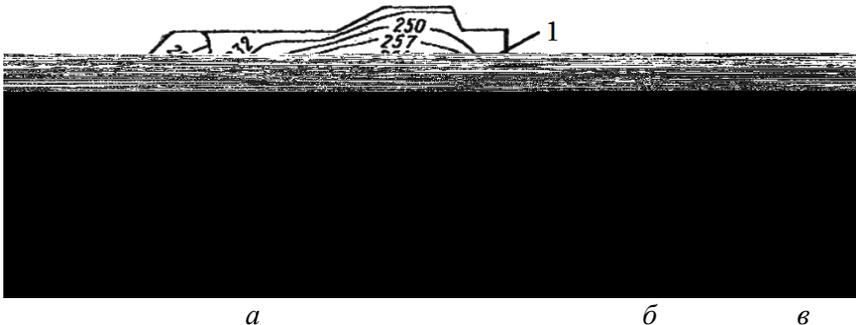


Рис. 1. Распределение изотерм в заднем тормозном барабане автобуса семейства ЛАЗ, полученных электро моделированием (а) и тормозные биметаллические барабаны с высокими (б) и низкими (в) ребрами на их ободах: 1, 2 – обод и боковая стенка обода тормозного барабана; 3 – чугунный барабан; 4, 5 – венец с ребрами, изготовленными из алюминиевого сплава

Более низкая объемная температура боковой стенки обода тормозного барабана объясняется тем, что внешняя его поверхность (полированная) примыкает к ступице колеса и принимает участие в кондуктивном теплообмене, а наружная (матовая) - является свободной и омывается воздушными потоками, циркулирующими в полости барабанно-колодочного тормоза, т. е. принимает участие у вынужденном конвективном теплообмене.

Отвод теплоты с поверхности трения тормозного барабана может быть улучшен: применением для его ободов металлов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности; увеличением площади наружной поверхности обода барабана вынужденным охлаждением за счет оребрения; улучшения вентиляции рабочих и нерабочих поверхностей тормозного барабана.

В [3] исследовано влияние различных факторов (удельной нагрузки, возникающей в парах трения при их взаимодействии; коэффициента взаимного перекрытия трущихся поверхностей; поверхности теплоотдачи, т.е. наружной поверхности обода тормозного барабана; площади вентиляционных отверстий диска колеса; площади сечения воздушного зазора между наружной поверхностью обода тормозного барабана и ободом колеса; площади стыковки барабана и ступицы колеса) на теплонагруженность пар трения тормозов автотранспортных средств. Установлено, что увеличение удельных нагрузок в паре трения и коэффициента ее взаимного перекрытия вызывает некоторое повышение температуры фрикционных пар тормозов. В свою очередь, уменьшение площади сечения воздушного зазора между барабаном и ободом колеса ведет к увеличению поверхностных температур рабочих деталей тормозов. И наконец, увеличение поверхности теплоотдачи барабана, площади вентиляционных отверстий диска колеса, площади стыковки боковой стенки барабана к фланцу ступице колеса с учетом условия нормальной работы ее подшипников способствует снижению теплонагруженности трущихся поверхностей тормозов автотранспортных средств.

Оценка влияний толщины обода тормозного барабана, теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности его материала, длительности торможения, удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности обода тормозного барабана на поверхностные температуры фрикционных пар барабанно-колодочных тормозов в стендовых условиях приведена в [3]. Получены зависимости для определения температур трущихся поверхностей тормозов при кратковременном и длительном режимах их нагружения. Расхождение расчетных и экспериментальных значений температур в пределах 80–430 °С не превышало 8-10%.

Однако в представленных исследованиях не было уделено внимание влиянию конструктивных и теплофизических параметров, а также механических свойств материалов тормозных барабанов и стыковки боковых стенок их ободов с фланцем ступицы заднего моста автотранспортного средства на термонагруженность ободов барабанов.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к исследуемой проблеме:

- циркуляция тепловых токов в элементах тормозных барабанов;
- термонапряжения в ободах тормозных барабанов: математическое описание;
- результаты исследований.

Цель работы. Оценить термонапряжения в ободу тормозного барабана ав-

тотранспортного средства, исходя из конструктивных, теплофизических и механических свойств материалов барабанов.

Циркуляция тепловых токов в элементах тормозных барабанов. Нагревание при электротермомеханическом трения и связанные с ним термомеханические явления могут значительно влиять на трибологическое поведение скользящих элементов. Эти эффекты включают тепловую деформацию и термоупругую неустойчивость, а также термомеханические напряжения и терморастрескивание.

Тепловые деформации и напряжения обода тормозного барабана возникают в результате перепада температур в радиальном и осевом направлениях; кроме того, они зависят от того, с какой интенсивностью происходит сток теплоты от обода к боковой стенке барабана и далее в зависимости от его толщины. Температуры наружной и внутренней поверхностей обода тормозного барабана различаются незначительно. Перепад температур по образующей обода, т. е. в осевом направлении, бывает существенным, что и вызывает значительные термические деформации и напряжения. В этом случае функциональная зависимость температуры обода барабана от линейной координаты определяется опытным путем и может быть аппроксимирована некоторой аналитической функцией, обусловленной графиком распределения температур.

После завершения подготовки модели обода тормозного барабана и ее рабочую поверхность нагружали тепловым потоком, вызвавшим поверхностную температуру 400°C , равную допустимой температуре для материалов фрикционной накладки при коэффициенте теплоотдачи от матовых поверхностей барабана равному $11,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ и температуре окружающей среды $22,0^{\circ}\text{C}$. В результате получили распределение объемных температур (рис. 2, а) и тепловых потоков (рис. 2, б) по толщине обода барабана с рабочей 1 и нерабочей 2 поверхностью, а также его боковой стенки б и фланца ступицы колеса 7. При этом левая сторона обода является заземленной 3, поскольку сопряжена с его боковой стенкой б, а правая сторона – незаземленной 4, т.е. свободной. Такое размещение краев обода барабана свидетельствует о максимальных величинах удельных нагрузок на левой стороне обода барабана, уменьшающихся к его правой стороне. Последняя со своей рабочей поверхностью обода 1 под действием термомеханического явления испытывает механические и тепловые деформации, и как следствие, механотермоупругую неустойчивость. Несовместимость весовых характеристик подкрепляющего кольца 5, находящегося на нерабочей поверхности 2 обода со стороны его свободного края в сравнении из сопряжением обода барабана с боковой стенкой б оказывает существенное влияние на распределение объемных температур в рабочей части обода барабана. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что боковая стенка обода б своей поверхностью, соприкасается не полностью с поверхностями фланца ступицы заднего моста 7, что также существенно влияет на величины объемной температуры в фланце б обода барабана.

Для исследования тепловых потоков в ободке тормозного барабана его боковая стенка б с помощью теплоизоляции 8 отделен от поверхностей фланца ступицы 7 колеса (рис. 2, б). На рабочей поверхности 1 обода барабана на участке I-I и II-II развивается максимальные основные тепловые потоки, которые распространяются от границ I-I и II-II вправо и влево, соответственно, в сторону

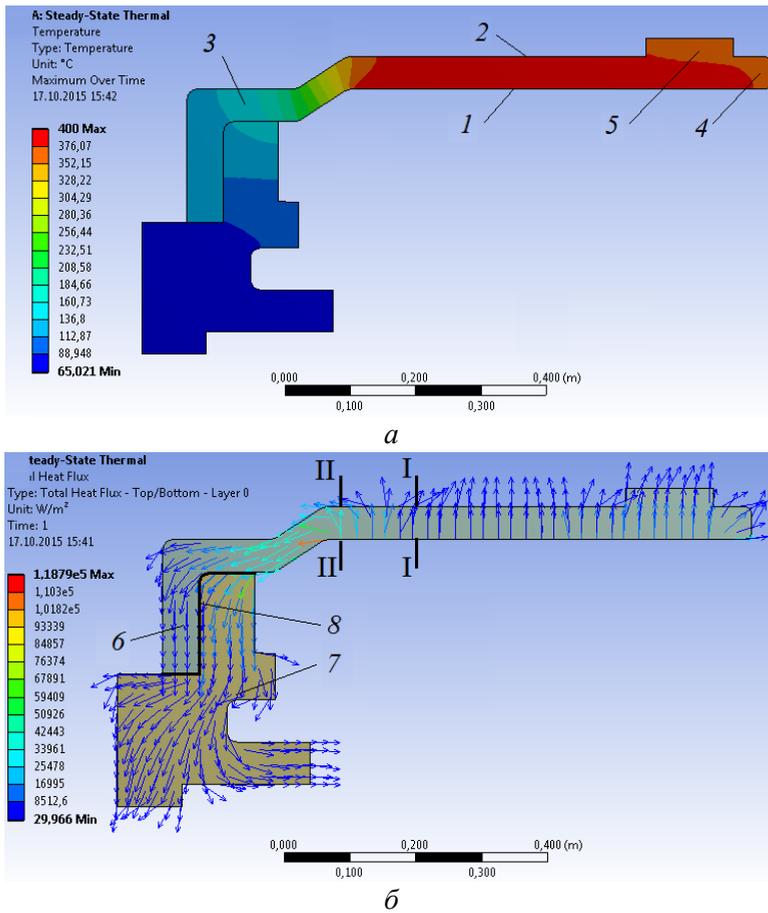


Рис. 2. Распределение тепловых токов в серийном тормозном барабане автомобиля КраЗ-250: *a* – с нетеплоизолированной ступицей колеса от боковой стенки барабана; *б* – с теплоизолированной ступицей колеса от боковой стенки барабана; 1, 2 – рабочая и нерабочая поверхности обода барабана; 3, 4 – защемленный и незащемленный край обода барабана; 5 – подкрепляющее кольцо; 6 – боковая стенка обода барабана; 7 – фланец ступицы заднего моста; 8 – теплоизоляция

свободного края обода с подкрепляющим кольцом 5 и к боковой стенке 6 обода. В боковую стенку 6 обода основные тепловые потоки попадают напрямую, а в правой части основные потоки тормозятся дополнительными тепловыми потоками, которые возникают на остальной площади полированной рабочей поверхности 1 обода тормозного барабана при электротермомеханическом трении. При этом дополнительные тепловые потоки от границы участка II-II идут на нагревание обода барабана. При этом необходимо учитывать тот факт, что интенсивность теплообмена от полированной рабочей поверхности 1 обода барабана намного выше, нежели от его боковой стенки 6 и нерабочей поверхности 2 при условии, что рассматриваемые поверхности теплообмена имеют различные площади. Что касается фланца ступицы 7 заднего моста, то она является накопителем тепловой энергии из-за слабой вынужденной конвекции от его матовых поверхностей.

Термонапряжения в ободах тормозных барабанов: математическое описание. Прежде чем рассмотреть термонапряжения в ободу тормозного бара-

бана оценим тепловые деформации. Последние сдвинуты по фазе на $\pi/2$ по отношению к термонапряжениям обода тормозного барабана при их волновой природе изменения.

Пусть $t_n = F_{(x)}$ представляет собой поверхностные температуры оболочки, отсчитываемые от некоторой постоянной начальной температуры. Предположим, что оболочка разделена плоскостями, перпендикулярными оси x , на бесконечно тонкие кольца, тогда радиальное расширение колец вследствие изменения температуры будет $2R_c F_{(x)}$, где R_c – радиус срединной поверхности оболочки (рис. 3, а). Это расширение можно устранить, вернув оболочку к ее начальному диаметру путем наложения внешней удельной нагрузки следующей интенсивности z_n :

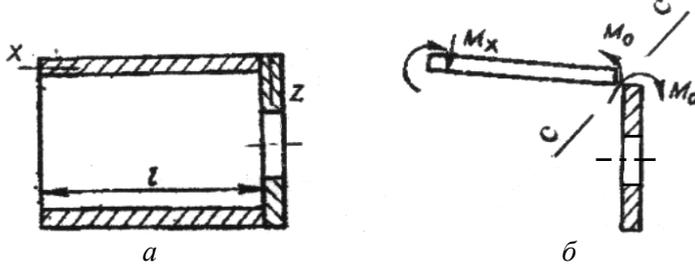


Рис. 3. Расчетная схема тормозного барабана (а) и его обода в сопряжении с боковой стенкой (б)

$$\frac{R_c z_n}{E \delta} = \alpha_l R_c F_{(x)}, \text{ откуда } z_n = \frac{E \delta \alpha_l}{R_c} F_{(x)}, \quad (1)$$

где δ – средняя толщина стенки обода барабана; α_l – коэффициент линейного расширения материала обода тормозного барабана; E – модуль упругости материала оболочки.

Нагрузка интенсивности z_n полностью устраняет температурные расширения оболочки, вызывающие в ней лишь окружные напряжения величин

$$\delta_\varphi = -R_c z_n / \delta = -E \alpha_l F_{(x)}. \quad (2)$$

Чтобы получить полные температурные напряжения, нужно на напряжения (2) наложить напряжения, вызываемые в оболочке нагрузкой интенсивности z_n . Последнюю прикладывают для того, чтобы разгрузить боковую поверхность оболочки от внешней нагрузки, описываемой зависимостью (1). Напряжения, вызванные нагрузкой определяются посредством интегрирования дифференциального уравнения

$$\frac{d^4 W}{dx^4} + 4\beta_0^4 W = \frac{z_n}{D}, \quad (3)$$

где β_0 – параметр оболочки; $\beta_0 = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)/(R_c^2 \delta^2)}$; μ – коэффициент Пуассона; D – цилиндрическая жесткость оболочки; $D = E \delta^3 / 12(1-\mu^2)$.

Обычно для данной подкатегории автотранспортных средств устанавливается значение параметра $\beta_0 l \geq 1,7$.

После преобразований получаем

$$\frac{d^4 W}{dx^4} + 4\beta_0^4 W = -\frac{E \delta \alpha_l}{D R_c} F_{(x)}. \quad (4)$$

Рассмотрим случай изменения температуры по толщине оболочки на основании линейного закона

$$t = t_o + \frac{(t_2 - t_o)x}{l}; \quad F_{(x)} = \frac{(t_2 - t_o)x}{l}, \quad (5)$$

где t_2 и t_o – температуры усредненная поверхности трения обода тормозного барабана после торможения и окружающего воздуха; l – длина оболочки.

После подстановки уравнения (5) в (4) имеем

$$\frac{d^4 W}{dx^4} + 4\beta_0^4 W = -\frac{E\delta\alpha_n}{DR_c l} (t_2 - t_o)x.$$

$$W_1 = A'x; \quad 4\beta_0^4 A' = -\frac{E\delta\alpha_n}{DR_c l} (t_2 - t_o)x.$$

$$A' = -\frac{R_c\alpha_n}{l} (t_2 - t_o); \quad A' = -\frac{R_c\alpha_n}{l} (t_2 - t_o)x.$$

Угол разрыва в сечении (с) при $t=t_o$ (рис. 3 б) выражается зависимостью

$$\frac{W_1}{x} = -\frac{R_c\alpha_n}{l} (t_2 - t_o).$$

При граничном условии $x = 0$ получаем

$$\left(\frac{dW_1}{dx} \right)_{x=0} = -\frac{R_c\alpha_n}{l} (t_2 - t_o) = \frac{1}{2\beta_0^2 D} 2\beta_0 M_0.$$

Чтобы устранить показанный на рис. 3 б разрыв, необходимо приложить момент M_0 [4]:

$$M_0 = -\beta_0 D \frac{R_c\alpha_n}{l} (t_2 - t_o); \quad (6)$$

$$W_2 = l^{\beta_0 x} (C'_1 \cos \beta_0 x + C'_2 \sin \beta_0 x) + l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x),$$

при

$$x = l; \quad M_0|_{x=0} = 0; \quad Q|_{x=0} = Q_x;$$

$$W_2 = l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x);$$

$$M_x = -D \frac{d^2 W_1}{dx^2} = M_0 \varphi(\beta_0 l); \quad Q_x = -D \frac{d^3 W_1}{dx^3} = -2\beta_0 M_0 \xi(\beta_0 l);$$

$$C'_3 = -\frac{1}{2\beta_0^3 D} (Q_x + \beta_0 M_x); \quad C'_4 = -\frac{M_x}{2\beta_0^2 D};$$

$$W = l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x),$$

где C'_1, C'_2, C'_3, C'_4 – постоянные интегрирования.

Деформации, возникающие от теплового воздействия по длине обода барабана, будут распределяться по следующему закону:

$$W = l^{-\beta_0 x} \left[\frac{M_0 \varphi(\beta_0 l)}{2\beta_0^3 D} \sin \beta_0 x + \frac{M_0 \varphi(\beta_0 l) + 2M_0 \xi(\beta_0 l)}{2\beta_0^2 D} \cos \beta_0 x \right]. \quad (7)$$

При нелинейном законе распределения температур по ширине обода барабана, описываемого $t = a'l^{b'x} + c'$, где a', b' и c' – постоянные, определяемые в каждом конкретном случае из графических зависимостей, полученных экспериментально:

$$\frac{d^4 W}{dx^4} + 4\beta_0^4 W = (a'l^{b'x} + c') \left(-\frac{E\delta\alpha_{\perp}}{DR_c} \right);$$

$$W_2 = l^{-\beta_0 x} (C'_1 \cos \beta_0 x + C'_2 \sin \beta_0 x) + l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x);$$

$$W_1 = Al^{-\beta_0 x} + B; \quad Ab'^4 l^{b'x} + 4\beta_0^4 Al^{b'x} + 4\beta^4 B = -\frac{E\delta\alpha_{\perp}}{DR_c} a'l^{b'x} - \frac{E\delta\alpha_{\perp}}{DR_c} c';$$

$$A = -\frac{ES\delta\alpha_{\perp}}{DR_c} a' \frac{1}{b'^4 + 4\beta_0^4}; \quad B = -\frac{ES\delta\alpha_{\perp}}{DR_c \beta_0^4} c';$$

$$W = l^{\beta_0 x} (C'_1 \cos \beta_0 x + C'_2 \sin \beta_0 x) + l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x) + Al^{\beta_0 x} + B,$$

при

$$x = 0, \quad W = 0, \quad dW/dx = 0.$$

Для тормозных барабанов задней оси автобусов можно в пределах 10 % ошибки считать барабан длинной оболочкой, тогда

$$W = l^{-\beta_0 x} (C'_3 \cos \beta_0 x + C'_4 \sin \beta_0 x) + Al^{\beta_0 x} + B. \quad (8)$$

Используя граничные условия (7), определяем постоянные интегрирования:

$$C'_3 = -(A+B) = \frac{E\delta\alpha_{\perp}}{DR_c} \left(\frac{a'}{b'^4 + 4\beta_0^4} + \frac{c'}{\beta_0^4} \right); \quad C'_4 = \frac{Ab'}{\beta_0^2} = -\frac{ES\delta\alpha_{\perp} a' b'}{DR_c \beta_0^2} \frac{a'}{b'^4 + 4\beta_0^4}.$$

Подставляя C'_3 и C'_4 в уравнение (8), получаем зависимость, позволяющую определять температурные деформации обода барабана. Последние вызывают в ободу тормозного барабана термические напряжения. Последние определяем по зависимости вида

$$\sigma_{терм} = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (9)$$

Напряжения от действия поверхностного температурного градиента

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_{\perp} E (t_1 - t'_1)}{2(1 - \mu)}, \quad (10)$$

где t_1, t'_1 - температуры: рабочей и внешней поверхности обода барабана.

Напряжения от действия температуры по толщине обода барабана

$$\sigma_2 = \frac{\alpha E (t_{1cp} - t_{2cp})}{1 + A_1 / A_2}, \quad (11)$$

где t_{1cp}, t_{2cp} - объемная температура боковой стенки обода барабана и фланца заднего моста автотранспортного средства; A_1, A_2 - площади поперечных сечений боковой стенки обода барабана и фланца заднего моста автотранспортного средства.

На основании вышеизложенного перейдем к анализу результатов исследований термонапряжений ободов тормозных барабанов.

Результаты исследований. На основании имеющихся многочисленных экспериментальных данных, касающихся энергонагруженности автотранспортных средств, были выполнены расчеты по зависимостям (9)-(11). Результаты расчетов приведены в табл., из которой следует: при переменных конструктивных ($R_{об}$ и δ) и постоянной величине (A_1/A_2) параметров, квазипостоянном теплофизическом (α_{\perp}) параметре и механических свойств (E и μ) материала ободов тормозных барабанов и переменных параметрах энергонагруженности [$t_1, (t_1 - t'_1)$ и ($t_{1cp} - t_{2cp}$)] ободов тормозных барабанов и его боковой стенки, а также фланца

Таблица

Конструктивные и теплофизические параметры тормозных барабанов и механические свойства материалов при оценке термонапряжений их ободов

$t_v,$
°C

ступицы заднего моста при условии, что приращение температуры рабочей поверхности обода всегда больше приращения его объемной температуры, получены величины термонапряжений, развивающихся в ободах тормозных барабанов автотранспортных средств. Анализ величин термонапряжений ободов тормозных барабанов автотранспортных средств, приведенных в табл., позволил сделать следующие выводы:

– увеличение радиусов рабочих поверхностей ободов тормозных барабанов способствует увеличению работы трения фрикционными узлами тормоза при непременном росте тормозного момента, и как следствие, поверхностных и объемных температур, и в конечном итоге термонапряжений;

– увеличение толщины обода тормозного барабана при постоянном радиусе его рабочей поверхности способствует увеличению энергоемкости, т.е. градиента температуры между внутренней и наружной поверхностью обода, и как следствие, термонапряжений;

– при постоянной величине A_1/A_2 (отношение поверхностей боковой стенки обода барабана к фланцу ступицы моста) и с уменьшением градиента объемной температуры при увеличении $R_{об}$ и δ наблюдается увеличение термонапряжений обода барабана, поскольку уменьшается кондуктивный теплообмен между указанным выше сопряжением.

Выводы. Таким образом, произведена оценка термонапряжений, развивающихся в ободу тормозного барабана, и установлено влияние конструктивных, теплофизических параметров и механических свойств материалов на их величины.

Список литературы

1. ГОСТ Р 41.13 – 2007 (Правила №13 ЕЭКНООН). Единообразные предписания, касающиеся транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения. – М.: Стандартформ, 2009. – 170с.

2. Бухарин Н. А. Автомобили / Н. А. Бухарин, В. С. Прозоров, М. М. Щукин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 504с.

3. Гудз Г. С. Температурные режимы фрикционных узлов автотранспортных средств. / Г. С. Гудз. – Харьков: ХГАДТУ, 1998. – 139с.

4. Барабанно-колодочные тормозные устройства / [А. А. Петрик, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко]. Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия) – Краснодар, 2006. – 264с.

*O. I. ВОЛЬЧЕНКО, М. В. КИНДРАЧУК, І. О. БЕКІШ, В. Я. МАЛИК,
В. І. ШУРНИКОВ*

**ТЕРМІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В ОБОДАХ ГАЛЬМІВНИХ
БАРАБАНІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

В матеріалах статті здійснена оцінка термічних напружень в ободах гальмівних барабанів (автотранспортних засобів), виходячи із їх конструктивних и теплофізичних параметрів, а також механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: барабанно-колодкове гальмо, гальмівний барабан з ободом і боковою стінкою, конструктивні и теплофізичні параметри, механічні властивості матеріалів барабанів.

*A. I. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, I. O. BEKISH, V. Y. MALIK,
V. I. SNURNIKOV*

THERMAL STRESSES OF THE RIMS OF BRAKE DRUMS IN VEHICLES

We've assessed thermal stresses in e