

ОБЪЁМНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСК–МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ШИНА–АСФАЛЬТОБЕТОН

маг. Грибовский Г.В., д.ф.-м.н. Щербаков С.С.

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. Компьютерные модели, позволяющие описать пространственное напряженно-деформированное состояние системы автомобильная шина–асфальтобетон имеют большое практическое значение для автомобильного транспорта. Также важными задачами для производителей автомобильных шин и для автодорожных служб являются оценка объёмной повреждаемости и износа протектора шины и асфальтобетонного покрытия, работающих в условиях контактной, механической и фрикционной усталости. Существует большое количество работ, посвящённых аналитическому и компьютерному моделированию напряженно-деформированного состояния отдельных компонентов указанной системы [1,2,3]. Однако, задача оценки одновременных контактных взаимодействий элементов системы, их трехмерного напряженно-деформированного состояния и состояния объёмной повреждаемости остаётся не до конца решённой.

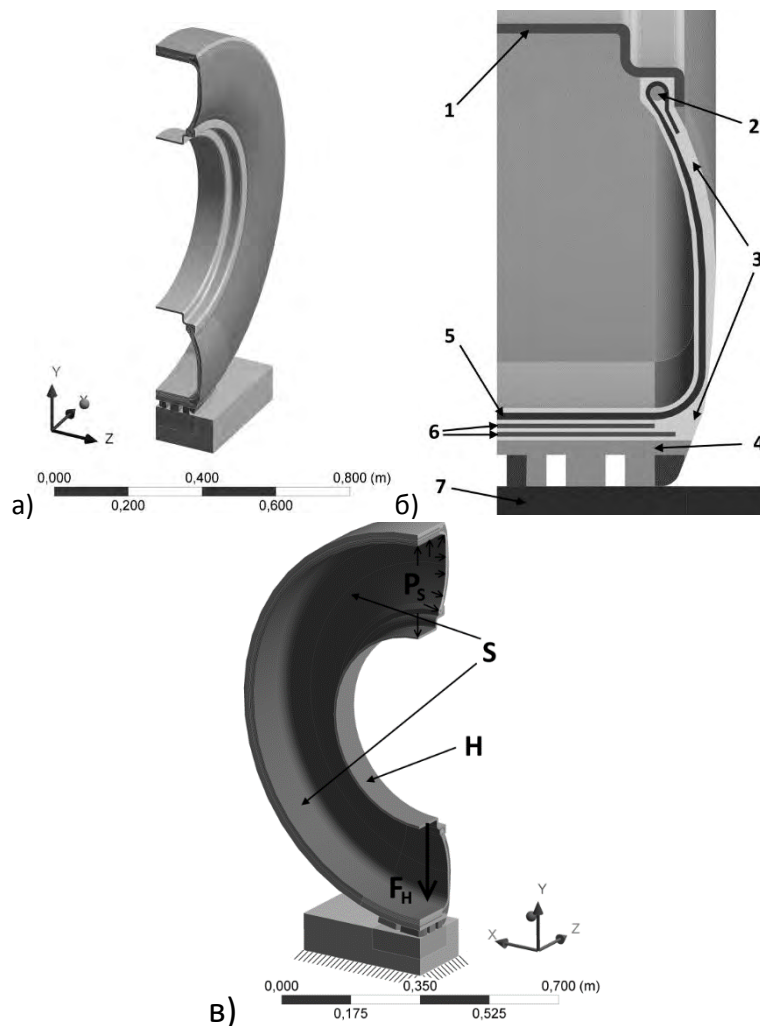


Рис. 1. Общий вид модели (а), схематичное обозначение материалов (б) и схема нагружения (в)

Целью работы является определение с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования указанных выше состояний трибофатической системы диск–многокомпонентная шина–асфальтобетон.

Подготовка геометрии и задание механических характеристик. В расчётах применялась готовая геометрическая модель стального диска и грузовой шины радиуса 22,5 дюйма, имеющей ромбовидный протектор [4]. Геометрические параметры модели довольно сложны: даже небольшие изменения модели оказывают значительное влияние на построение конечно-элементной сетки. В результате переработки модели шины были удалены зубья протектора, которые не входят в контакт с асфальтобетоном, и некоторые другие элементы геометрии, которые не давали практически значимых для анализа результатов. Это способствовало упрощению построения конечно-элементной сетки, а также ускорению времени расчёта модели. Асфальтобетонное покрытие моделировалось прямоугольным параллелепипедом размером 350x100x175 мм. Для ускорения расчётов, в силу симметрии модели, использовалась ее четверть (рис. 1а).

По сравнению с работой [4], в которой рассматривалась однородная шина с усреднёнными упругими характеристиками, в настоящем исследовании шина моделируется как многокомпонентная система, в которую были дополнительно добавлены следующие элементы [5]: бортовое кольцо, два слоя стального брекера, нейлоновый каркас, резиновый протектор (см. рис. 1б и табл. 1).

Таблица 1 – Механические характеристики элементов модели

	Модуль упругости E , Па	Коэффициент Пуассона ν	Плотность ρ кг м ⁻³
1. Стальной диск	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7850
2. Бортовое кольцо	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7850
3. Резина [1]	$8 \cdot 10^6$	0,49	1100
4. Резиновый протектор [1]	$4 \cdot 10^6$	0,49	1100
5. Нейлоновый каркас [1]	$9 \cdot 10^{10}$	0,3	1500
6. Стальной брекер [1]	$1,7 \cdot 10^{11}$	0,3	1100
7. Асфальтобетон [3]	$14,77 \cdot 10^8$	0,1	2510

Конечно-элементное разбиение и граничные условия. Особое внимание в работе уделяется трехмерному напряженно-деформированному состоянию и объёмной повреждаемости в зоне контакта. Поэтому в рассматриваемой области, в направлении действия радиальной нагрузки, была задана более плотная расчетная сетка (см. рисунок 1а, 1б).

Для более точной конечно-элементной оценки объёмной повреждаемости в зоне контакта шины и асфальтобетона, было проведено субмоделирование рассматриваемой области. Оно проводилось посредством переноса перемещений, полученных из расчета полной модели системы диск–многокомпонентная шина–асфальтобетон, на грани субмоделируемой области (рис. 2в), и последующего решения дополнительной граничной задачи для данной области.

Были заданы следующие граничные условия для системы (рис. 1в):

- 4) внутреннее давление \bar{p}_n в шине на поверхности S :

$$\sigma_n |_S = \bar{p}_n = 850 \text{ кПа}; \quad (1)$$

- 5) радиальная нагрузка F_y направленная вдоль Oy , приложенная к поверхности H :

$$\sigma_{ij} \alpha_j |_H = \bar{p}_i (F_y = -2500 \text{ Н}), \quad (2)$$

где α_j – направляющие косинусы.

6) основание асфальтобетонного покрытия жестко зафиксировано во всех направлениях:

$$u_i = 0, \quad i=x,y,z; \quad (3)$$

7) на поверхностях взаимодействия элементов (слоев) шины были заданы условия сцепления:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}}_l|_{S_u^{(lm)}} - \bar{\mathbf{u}}_m|_{S_u^{(lm)}} &= 0, \\ \bar{\mathbf{p}}_l|_{S_\sigma^{(lm)}} - \bar{\mathbf{p}}_m|_{S_\sigma^{(lm)}} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $S^{(lm)}$ – поверхность контакта элементов шины l и m , $S_\sigma^{(lm)} \subset S^{(lm)}$, $S_u^{(lm)} \subset S^{(lm)}$, $\bar{\mathbf{p}}_k = \{\bar{p}_x^k, \bar{p}_y^k, \bar{p}_z^k\} = \{p_n^k, p_{\tau 1}^k, p_{\tau 2}^k\}$ и $\bar{\mathbf{u}}_k = \{\bar{u}_x^k, \bar{u}_y^k, \bar{u}_z^k\}$ – векторы усилий и перемещений на поверхности k -го тела, $p_n^k, p_{\tau 1}^k, p_{\tau 2}^k$ – нормальная и касательные компоненты вектора усилий;

8) на поверхностях $S^{(ta)}$ контакта протектора шины (t) и асфальтобетона (a) были заданы условия контактного взаимодействия с трением по областям проскальзывания $S_\sigma^{(ta)} \subset S^{(ta)}$ и сцепления $S_u^{(ta)} \subset S^{(ta)}$:

$$\begin{aligned} \bar{p}_n^t|_{S_\sigma^{(ta)}} - \bar{p}_n^a|_{S_\sigma^{(ta)}} &= \bar{p}_n^{ta} - \bar{p}_n^{ta} = 0, \\ \bar{\mathbf{p}}_\tau^t|_{S_\sigma^{(ta)}} - \bar{\mathbf{p}}_\tau^a|_{S_\sigma^{(ta)}} &= \bar{\mathbf{p}}_\tau^{ta} - \bar{\mathbf{p}}_\tau^{ta} = 0, \quad \bar{p}_\tau^{ta} \leq f\bar{p}_n^{ta}, \\ \bar{\mathbf{u}}_n^t|_{S_u^{(ta)}} - \bar{\mathbf{u}}_n^a|_{S_u^{(ta)}} &= \bar{\mathbf{u}}_n^{ta} - \bar{\mathbf{u}}_n^{ta} = 0, \\ \bar{\mathbf{u}}_\tau^t|_{S_u^{(ta)}} - \bar{\mathbf{u}}_\tau^a|_{S_u^{(ta)}} &= \begin{cases} \bar{\mathbf{u}}_\tau^{ta} - \bar{\mathbf{u}}_\tau^{ta} = 0, \quad \bar{p}_\tau^{ta} < f\bar{p}_n^{ta}, \\ \Delta\bar{\mathbf{u}}_\tau^{ta} = var, \quad \bar{p}_\tau^{ta} = f\bar{p}_n^{ta}, \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

где f – коэффициент трения между шиной и асфальтом, $\Delta\bar{\mathbf{u}}_\tau^{ta}$ – переменная величина;

9) на поверхностях сечений модели в плоскостях xOy и yOz были заданы условия симметрии по оси z и x соответственно:

$$\begin{aligned} u_i(n) &= u_i(-n), \\ \sigma_{ij}(n) &= \sigma_{ij}(-n), \end{aligned} \quad (6)$$

где n – направление нормали к плоскостям симметрии.

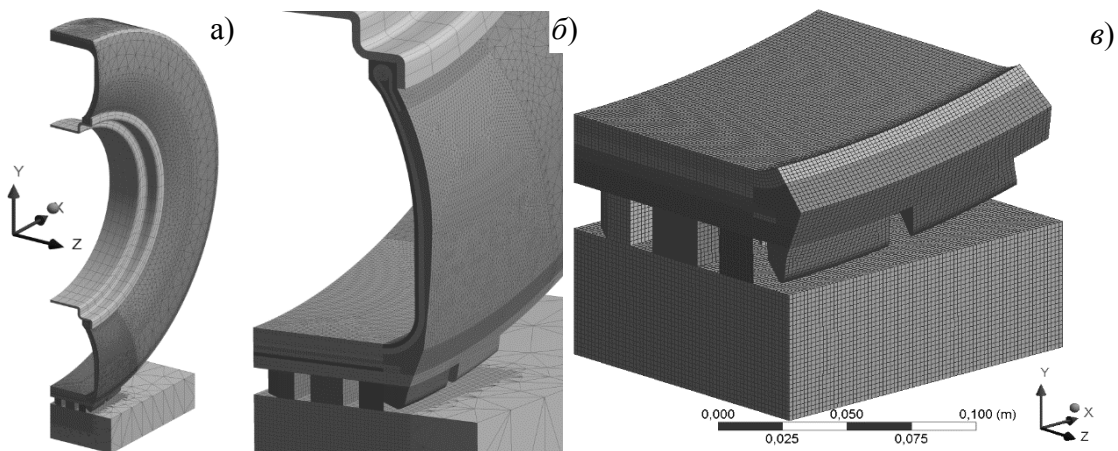


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение модели: вся модель (а), окрестность контактного взаимодействия (б) и область субмоделирования (в)

Значения внутреннего давления в шине и радиальной нагрузки на диск были взяты из нормативной литературы производителя [6]. Коэффициенты трения сталь–шина и шина–асфальтобетон, равные 0,6, были взяты из справочной литературы [7,8].

Анализ напряжённо-деформированного состояния. В системе диск–многокомпонентная шина–асфальтобетон максимальная интенсивность напряжений (рис. 3а, 3б) возникает в диске (~548 МПа) в направлении радиальной нагрузки F , а также в окрестности концентраторов напряжений. Также большие напряжения возникают в бортовом кольце шины, нейлоновом каркасе и в стальных слоях брекера.

Наибольшая интенсивность напряжений в резине (рис. 3в) имеет место в областях контакта с диском (~9 МПа) и асфальтобетоном, а также с нейлоновым каркасом в областях изгиба шины. Напряжения в резине примерно на 1,5 порядка меньше, по сравнению с остальными элементами системы.

В нейлоновом каркасе максимальные интенсивности напряжений образуются в зонах взаимодействия с бортовым кольцом (~390 МПа), наибольшего изгиба шины и в бортовой области (~260 МПа), где нейлоновый каркас испытывает наибольшие перемещения под действием силы F , внутреннего давления шины, стремясь сохранить её форму.

В нижнем, более широком стальном корде, наибольшие напряжения, порядка 419 МПа, образуются на его внешнем крае из-за значительного изгиба шины в данной зоне.

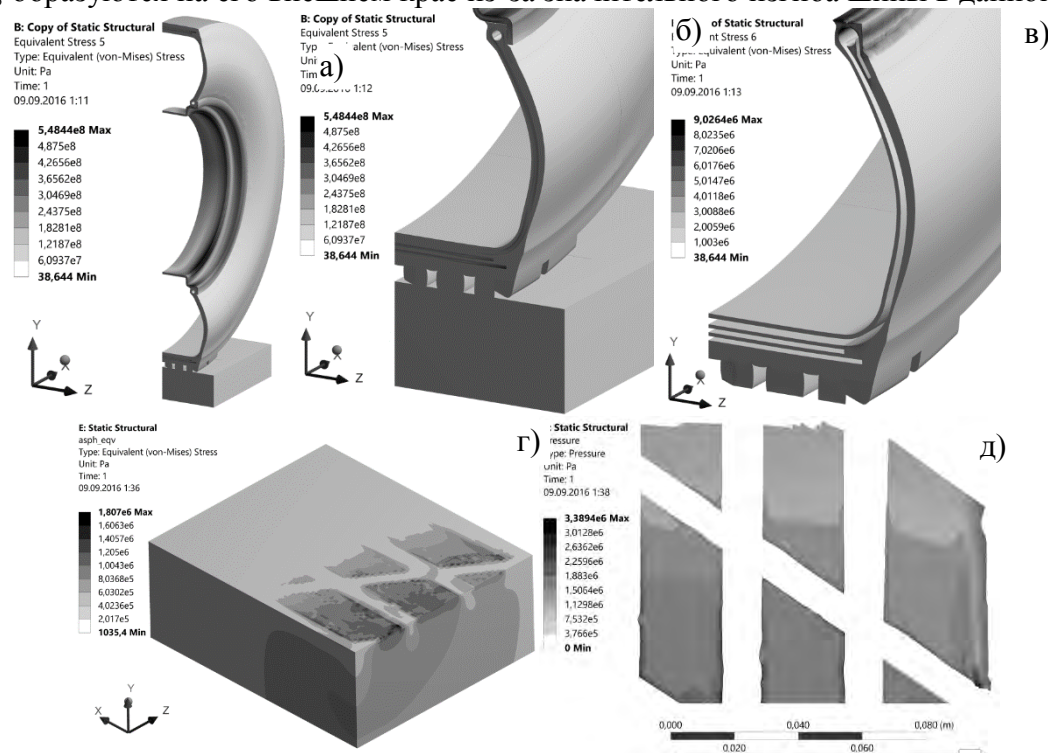


Рис. 3. Интенсивность напряжений во всей системе (а, б), в резине (в), асфальтобетоне (г), контактное давление в зоне контакта шины и асфальтобетона (д)

В асфальте наибольшая интенсивность напряжений (рис. 3г) и контактное давление (рис. 3д) сосредоточены ближе к центру асфальтобетонного покрытия, достигая величин 1,8 МПа и 3,4 МПа соответственно. В асфальтобетоне, как и в резине, максимальные напряжения гораздо ниже по сравнению с другими материалами системы. С другой стороны, деформации в резине примерно на порядок больше, т.к. резина имеет значительно меньшую жёсткость, чем, например, стальной диск и брекер. Наибольшие деформации резина испытывает в зоне контакта с диском и асфальтобетоном, а также в области сгиба нейлонового каркаса под диском.

Объёмная повреждаемость. Оценка повреждаемости проводилась на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [9]. В соответствии с данной

моделью опасный объем рассчитывался как сумма объемов конечных элементов, в которых действующие напряжения превышают предельные значения:

$$\Psi_{\text{int}} = \sigma_{\text{int}} / \sigma_{\text{int}}^{(\text{lim})}, \quad (7)$$

$$V_{\text{int}} = \{ \Psi_{\text{int}} \geq 1, dV \subset V_k \} \quad (8)$$

где σ_{int} – интенсивность напряжений, V_k – рабочий объем.

Интенсивность напряжений была выбрана для расчета опасных объемов, поскольку она позволяет учитывать касательные поверхностные усилия (силу трения).

Тогда формулы для расчета опасных объемов и интегральной повреждаемости будут следующими:

$$V_{\text{int}} = \int_{\Psi_{\text{int}}(V) \geq 1} dV, \quad \Psi_{\text{int}} = \int_{\Psi_{\text{int}}(V) \geq 1} \Psi_{\text{int}}(V) dV. \quad (9)$$

В работе рассматривается опасный объем в области контакта шины и асфальтобетона, которые работают в условиях фрикционной усталости. Предел фрикционной усталости $\sigma_{\text{int}}^{(\text{lim})}$ был выбран равным 0,5 МПа.

Для расчёта и визуализации опасных объемов в зоне контакта была написана специальная программа в среде Wolfram Mathematica, которая оперирует данными, экспортированными из пакета ANSYS Workbench.

Как видно из рисунков 4а–в, опасные объемы образуются непосредственно в областях наибольшего контактного давления в области взаимодействия шины с асфальтобетоном. Шкала под рисунками описывает уровень локальной повреждаемости (8) в опасном объеме (9), т.е. во сколько раз действующие в конечном элементе напряжения превышают предельные, равные 0,5 МПа.

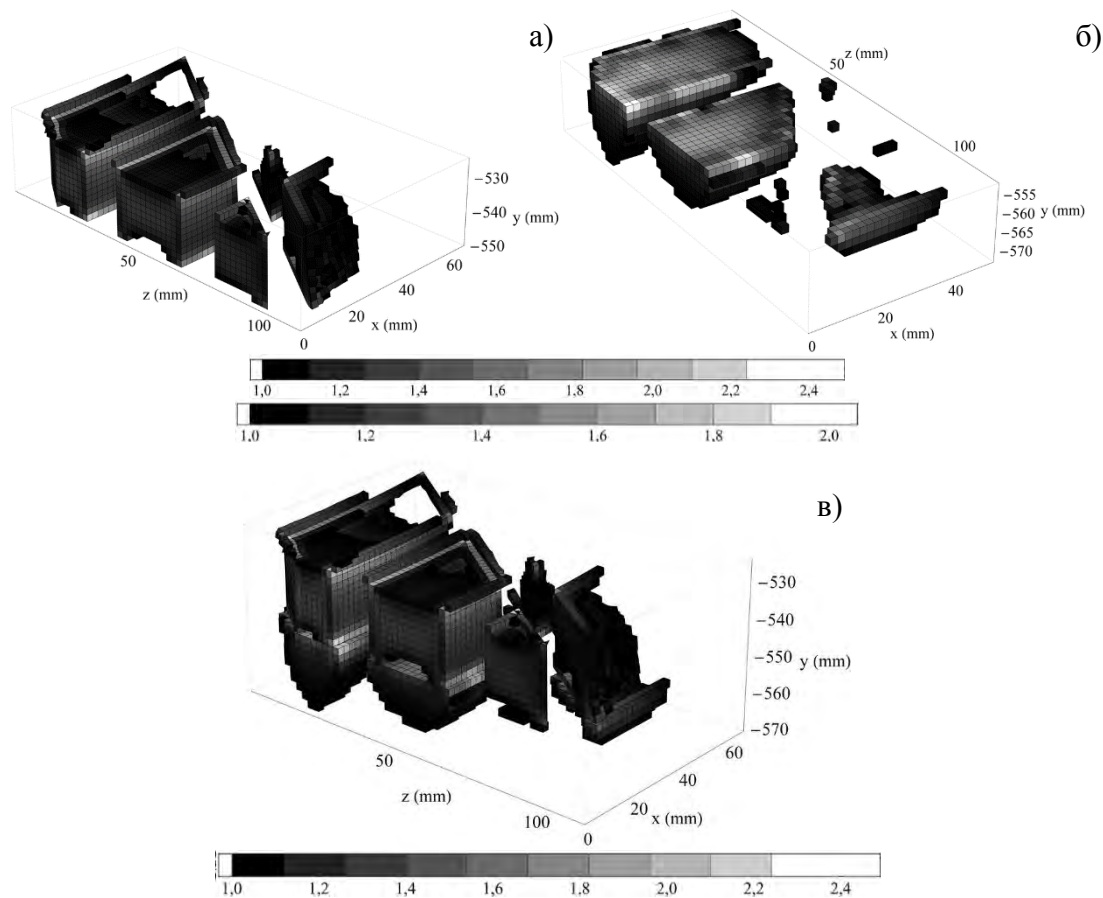


Рис. 4. Опасный объем по интенсивности напряжений V_{int} в протекторе (а), в асфальтобетоне (б), в области контакта шины и асфальтобетона (в)

Опасные объемы и повреждаемость в резине протектора примерно в 2-2,5 раза больше чем в асфальтобетоне (рис. 4, табл. 2). Большая повреждаемость резины про-

тектора, по сравнению с асфальтобетоном, в области контакта обусловлена тем, что жёсткость асфальта гораздо выше жёсткости резины. Кроме того, повреждаемость асфальтобетона (опасный объём) концентрируется лишь в малой области контактного взаимодействия. В связи с тем, что в работе моделировалась четверть шины в соответствии с условиями симметрии, в таблице 2 приведены опасные объёмы и интегральная повреждаемость, увеличенные в 4 раза.

Таблица 2 – Опасные объёмы и повреждаемость в области контакта

Опасный объём/ интегральная повреждаемость	в шине, мм ³	в асфальте, мм ³
V_{int}	168 238,4	77 540,8
Ψ_{int}	221 018,0	91 878,4

Заключение. Проведено компьютерное моделирование трехмерного напряжённо-деформированного состояния трибофатической системы диск–многокомпонентная шина–асфальтобетон, нагруженной внутренним давлением шины и радиальной нагрузкой на диск. Получено распределение напряжений в системе с учетом контактного взаимодействия между шиной и асфальтобетоном. Максимум контактного давления составил примерно 3,4 МПа. Показано, что напряжения в резине на 1-1,5 порядка ниже, а деформации выше, чем в стальном диске и нейлоновом каркасе, за счет большей жесткости последних. Проведено моделирование опасных объёмов в шине и асфальтобетонном покрытии в зоне контакта по интенсивности напряжений. Полученные опасные объёмы в асфальтобетоне оказались примерно 2-2,5 раза больше чем в шине в силу большей жёсткости асфальтобетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Imad L. Al-Qadi. Prediction of Tire-Pavement Contact Stresses and Analysis of Asphalt Pavement Responses: A Decoupled Approach / Imad L. Al-Qadi, Hao Wang // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2011. – №80. – С. 289–316.
2. Шейкина В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины с жёстким покрытием / Шейкина В.А. – Иваново: ИГЭУ, 2012.
3. Е.В. Вайнштейн. Исследование изменения касательных напряжений и вертикальных перемещений от лесовозного автопоезда в конструкции дорожной одежды и земляного полотна / Е.В. Вайнштейн, В.М. Вайнштейн, П.А. Нехорошков // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4–2. – Т. 23. – С. 39.
4. Щербаков С.С. Компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния и объёмной повреждаемости системы диск/автомобильная шина/асфальтобетон / Щербаков С.С., Грибовский Г.В. // Теоретическая и прикладная механика: междунар. научно-техн. сборник. Вып. 31. Минск: БНТУ, 2016. С. 351 – 355.
5. I. Lopez. Tire/road friction modeling / I. Lopez, B. de Bruijn, A.J.C. Schmeitz – Eindhoven: TU/e, 2007. – С. 9.
6. Goodyear truck tires. Technical data book. / Goodyear Dunlop Tires Operations S.A. – 2011. – С. 37.
7. Шмелёв А. Трение и его роль в креплении грузов / Шмелёв А. // Автоперевозчик. – 2010. – №6. – С. 82.
8. Коэффициенты трения скольжения // DPVA.info справочные таблицы для инженеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionOfSlicing/>. – Дата доступа : 07.02.2015.
9. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.

E-mail: sherbakovss@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2016