

УДК 539.3

Г.В. ГРИБОВСКИЙ

аспирант

E-mail: mmf.gribovskiy@gmail.com

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.07.2019.

## ОБЪЕМНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АВТОМОБИЛЬНАЯ ШИНА — АСФАЛЬТОБЕТОН» В ОБЛАСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ НА ШИНУ

*В статье рассматривается напряженно-деформированное состояние и объемная повреждаемость области контакта трибофатической системы «автомобильная шина — асфальтобетон» при различных нагрузках на диск и внутреннем давлении в шине. На основе конечно-элементного моделирования было получено напряженно-деформированное состояние всей системы при различных комбинациях нагрузок на автомобильную шину, а также повреждаемость резины и асфальтобетонного покрытия в области их контактного взаимодействия. В окрестности контакта рассматривались подобласти, где возникали наибольшие напряжения: резиновый протектор, асфальтобетон, резина в области изгиба нейлонового каркаса. Использовался классический анализ напряженно-деформированного состояния системы по максимальным напряжениям, а также трибофатический анализ опасных объемов. Получены зависимости максимальных значений интенсивности напряжений и соответствующей объемной повреждаемости рассматриваемых элементов от изменения значений радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине. Результаты исследования показывают, как изменяются значения максимальных напряжений и объемной повреждаемости при изменении нагрузок на автомобильную шину для диапазонов внутреннего давления шины от 0,65 до 0,85 МПа и радиальной нагрузки на диск от 6 до 10 кН. Сравнение двух разных подходов исследования напряженно-деформированного состояния элементов системы показало большую эффективность трибофатического подхода анализа по повреждаемости, чем по анализу максимальных напряжений. Зависимость значений объемной повреждаемости от нагрузок оказалась более ярко выраженной по сравнению с зависимостью максимальной интенсивности напряжений, изменения которых в некоторых случаях были бессистемными при изменении нагрузок и не отражали их влияние на напряженно-деформированное состояние.*

**Ключевые слова:** трибофатическая система, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, опасный объем, объемная повреждаемость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-95-101>

**Введение.** Сегодня в любой технической сфере большую роль играет компьютерное моделирование сложных механических систем и их комплексного взаимодействия. Данный подход позволяет рассмотреть различные случаи и комбинации воздействий на моделируемую систему и минимизировать количество натурных экспериментов. В частности, для производителей автомобильных шин и автодорожных служб большое значение имеют компьютерные модели, которые позволяют произвести комплексное моделирование трехмерного взаимодействия элементов трибофатической системы «автомобильная шина — асфальтобетон». Численное моделирование позволяет рассчитать пространственное НДС системы, что важно для дальнейшей оценки повреждаемости и износа как протектора шины, так и асфальтобетонного по-

крытия, работающих в условиях контактной, механической и фрикционной усталости.

Большое количество работ в данной области посвящено аналитическому и компьютерному моделированию НДС отдельных элементов системы «автомобильная шина — асфальтобетон» [1–6], часто пренебрегая другими элементами системы и воздействиями, которые могут значительно влиять на распределение напряжений и деформаций. Так в статье [1] проводится полное моделирование основных слоев шины, моделируется контактное взаимодействие между шиной и асфальтобетонном, однако не моделируется диск, и рассматривается только распределение контактного давления между протектором и дорожным покрытием. В работе [2] рассматривается НДС и контактное давление авиационной шины с влажным покрытием

при различных скоростях, однако шина рассматривается как однородная с эффективными механическими характеристиками, покрытие является абсолютно жестким, а передача нагрузки от диска не учитывается. В статье [3], напротив, рассматривается только НДС автодорожного покрытия, учитывая его многослойность (покрытие асфальта, щебня, песчаное покрытие, грунтовое и т. д.), но нагрузки от колес моделируются обычным приложением сил на асфальтобетонное покрытие.

Целью данной работы, по сравнению с предыдущими исследованиями, с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования комплексно, с учетом всех элементов системы, оценить трехмерное НДС и состояние объемной повреждаемости трибофатической системы «автомобильная шина — асфальтобетон» при различных комбинациях значений радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине, в условиях контактного взаимодействия протектора шины и асфальтобетонного покрытия.

**Конечно-элементная модель системы и ее механические характеристики.** При моделировании использовалась геометрическая модель стального диска и грузовой шины с ромбовидным протектором радиусом 22,5 дюйма с учетом ее основных конструктивных элементов, а асфальтобетонное покрытие задавалось как прямоугольный параллелепипед [5, 7] (рисунок 1 и таблица). Для сокращения времени расчетов и в силу симметрии модели была использована ее четверть.

В окрестности контактного взаимодействия шины и асфальтобетона задавалась более мелкая конечно-элементная сетка для получения гладких распределений компонент НДС и дальнейшей оценки объемной повреждаемости. (рисунок 2). Также в окрестности контакта шины и асфальтобетона было проведено ее субмоделирование для более точного расчета объемной повреждаемости [8, 9].

**Граничные условия.** В рассматриваемой трибофатической системе «автомобильная шина — асфальтобетон» были заданы следующие нагрузки и граничные условия [9, 10]:

- внутреннее давление  $P_s$  (рисунок 3) в шине на поверхности  $S$ , которое изменялось от 6 до 10 кН;
- радиальная нагрузка  $F_H$  (см. рисунок 3) была направлена вдоль  $Oy$ , приложена к поверхности  $H$  и изменялась от 0,65 до 0,85 МПа;
- основание асфальтобетонного покрытия было жестко зафиксировано во всех направлениях (см. рисунок 3);
- на поверхностях взаимодействия элементов шины были заданы условия сцепления;
- на поверхностях контакта протектора шины и асфальтобетона были заданы условия контактного взаимодействия с трением по областям проскальзывания и сцепления (коэффициент трения «резина — асфальтобетон» был равен 0,6).

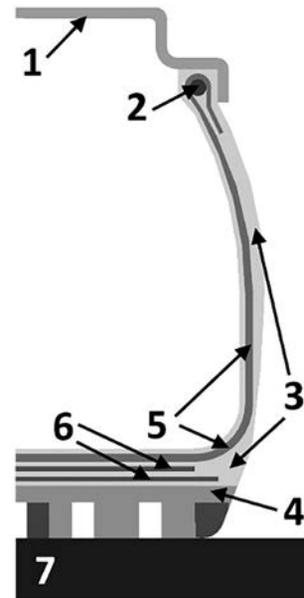


Рисунок 1 — Схематичное обозначение материалов системы «автомобильная шина — асфальтобетон»  
Figure 1 — Schematic designation of the materials of the system “car tire — asphalt concrete”

В итоге были рассчитаны НДС всей рассматриваемой системы и объемная повреждаемость в области контакта шины и асфальтобетона для 25 различных вариаций нагрузок.

**Анализ НДС и объемной повреждаемости.** Расчет интегральных показателей повреждаемости, как и в предыдущих работах [8–10], основан на использовании модели деформированного твердого тела с опасным объемом [11]. Формулы для расчета опасных объемов (1)–(2) и их интегральной повреждаемости (3) имеют следующий вид [10, 11]:

$$V_{\text{int}} = \iiint_{\Psi_{\text{int}}(V) \geq 1} dV; \quad (1)$$

$$\Psi_{\text{int}} = \sigma_{\text{int}} / \sigma_{\text{int}}^{(\text{lim})}; \quad (2)$$

$$\Psi_{\text{int}} = \iiint_{\Psi_{\text{int}}(V) \geq 1} \Psi_{\text{int}}(V) dV, \quad (3)$$

Таблица — Механические характеристики элементов модели  
Table — Mechanical characteristics of the model elements

	Модуль упругости, $E$ , Па	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Плотность, $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>
Стальной диск	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7850
Бортовое кольцо	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7850
Резина	$8 \cdot 10^6$	0,49	1100
Резиновый протектор	$4 \cdot 10^6$	0,49	1100
Нейлоновый каркас	$9 \cdot 10^{10}$	0,3	1500
Стальной бреккер	$1,7 \cdot 10^{11}$	0,3	1100
Асфальтобетон	$14,77 \cdot 10^8$	0,1	2510

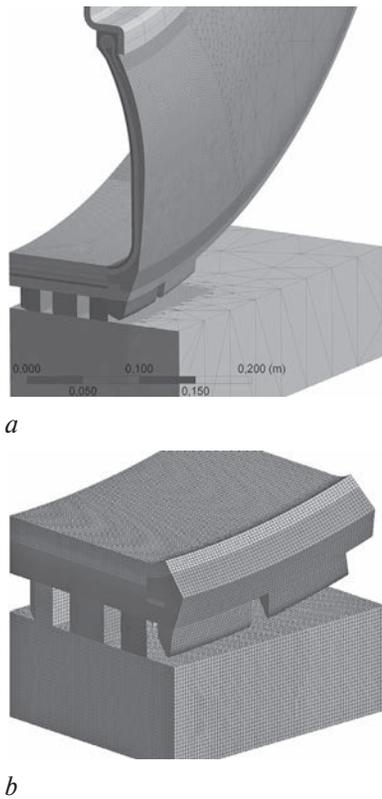


Рисунок 2 — Конечно-элементное разбиение всей модели (a) и в области субмоделирования (b)  
 Figure 2 — Finite element partitioning of the entire model (a) and in the submodeling area (b)

где  $\Psi_{int}$  — объемная повреждаемость;  $V_{int}$  — опасный объем;  $\sigma_{int}$  — интенсивность напряжений;  $\sigma_{int}^{(lim)}$  — предел допускаемых напряжений.

В работе рассматривается объемная повреждаемость в области контакта протектора шины и ас-

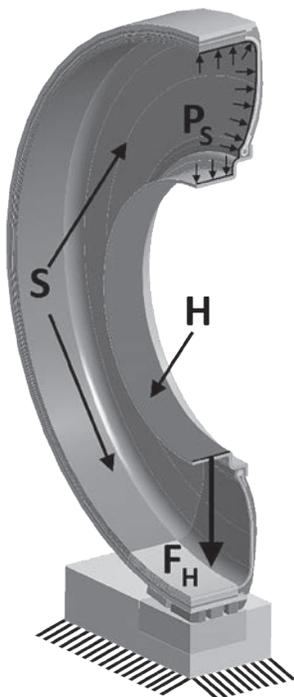


Рисунок 3 — Схема нагружения системы  
 Figure 3 — System loading diagram

фальтобетонного покрытия, которые работают в условиях фрикционной усталости. Предел допускаемых напряжений  $\sigma_{int}^{(lim)}$  для условий фрикционной усталости в области контакта равен 0,5 МПа, а для других резиновых элементов системы — 1 МПа.

В предыдущей работе [7] было рассмотрено НДС резиновых элементов шины и асфальтобетонного покрытия системы для некоторых нагрузок в трех ее характерных точках, где образуются наибольшие механические напряжения (рисунок 4):

- 1) в протекторе шины в области контакта;
- 2) в асфальтобетонном покрытии в зоне контакта;
- 3) в резине в области изгиба нейлонового каркаса.

В данной работе дальнейший анализ НДС и повреждаемости по интенсивности напряжений системы «автомобильная шина — асфальтобетон» также был рассмотрен по этим трем областям для большего диапазона нагрузок.

**Асфальтобетон.** Опасные объемы образуются непосредственно в областях наибольшего контактного давления при взаимодействии протектора шины с асфальтобетонным покрытием (пример опасного объема приведен на рисунке 5). Шкала под рисунками описывает уровень локальной повреждаемости в опасном объеме, т. е. во сколько раз действующие в конечном элементе напряжения превышают предельные.

С изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН максимальные значения интенсивности

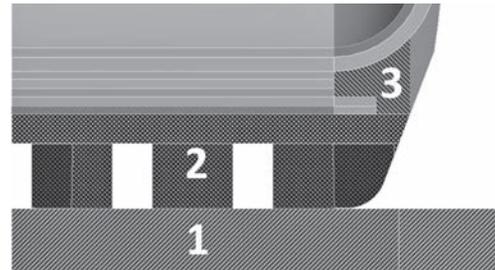


Рисунок 4 — Рассматриваемые области для анализа максимальных напряжений и повреждаемости:  
 1 — резиновый протектор; 2 — асфальтобетон; 3 — резина в области изгиба нейлонового каркаса  
 Figure 4 — Considered areas for analysis of maximum stress and damageability: 1 — rubber tread; 2 — asphalt concrete; 3 — rubber in the bending area of the nylon frame

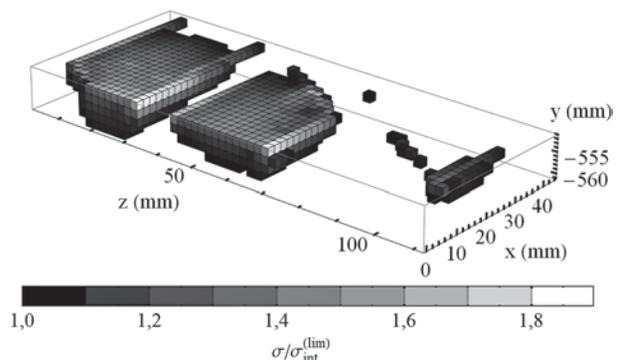


Рисунок 5 — Вид опасного объема в асфальтобетоне при  $P_s = 0,75$  МПа и  $F_H = 8$  кН  
 Figure 5 — Type of damaged volume in asphalt concrete with  $P_s = 0.75$  MPa and  $F_H = 8$  kN

напряжений увеличиваются нелинейно, примерно на 28–46 %, достигая максимума при  $F_H = 10$  кН (рисунок 6). Однако, исключение наблюдается при  $P_S = 0,75$  МПа, где наибольшее значение максимальной интенсивности напряжений достигается при  $F_H = 8$  кН. Повреждаемость же в асфальтобетоне увеличивается нелинейно в 6,6–8,2 раза. Значительное увеличение повреждаемости может быть связано с тем, что контактное давление в асфальтобетонном покрытии концентрируется в малой области контактного взаимодействия с протектором шины, т. е. в зубах протектора, через которые передается влияние радиальной нагрузки на диск.

При увеличении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа максимальная интенсивность напряжений изменяется нелинейно, в диапазоне 3–27 %. Наибольшие изменения максимальных напряжений наблюдаются при  $F_H = 8$  кН, а минимальные при 6 и 9 кН. Следует отметить, что отсутствуют явные зависимости максимальных значений интенсивности напряжений от увеличе-

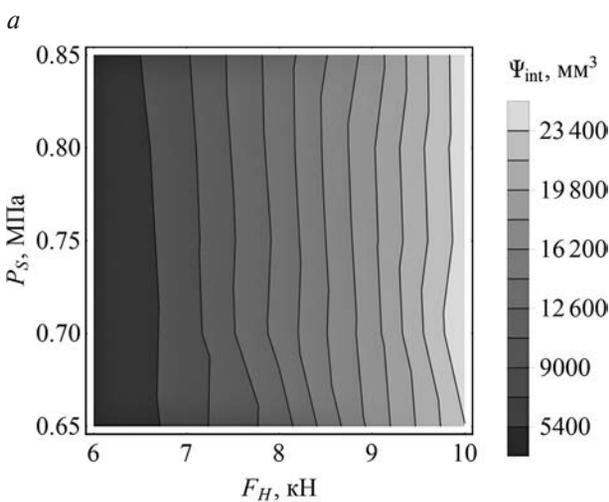
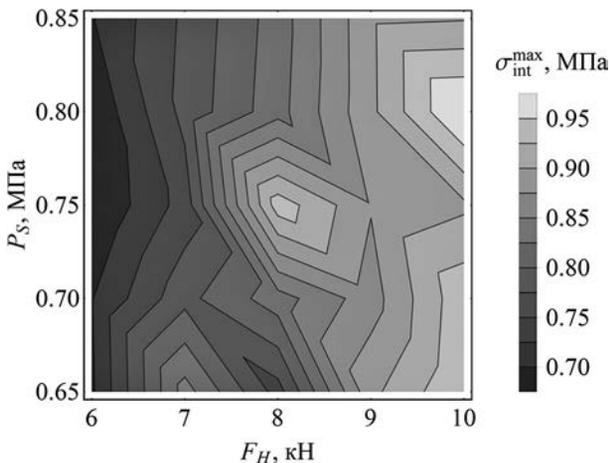


Рисунок 6 — Максимальные напряжения (а) и повреждаемость (б) для асфальтобетона при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск  $F_H$  и внутреннего давления в шине  $P_S$   
Figure 6 — Maximum stresses (a) and damageability (b) for asphalt concrete at different ratios of radial load on the disk  $F_H$  and internal tire pressure  $P_S$

ния внутреннего давления в шине. В то же время, повреждаемость в асфальтобетоне увеличивается на 3–30 % при увеличении внутреннего давления в шине. Наименьшее увеличение значений повреждаемости наблюдается при  $F_H = 9$  кН, а наибольшие — при  $F_H = 6$  кН.

Анализ по напряжениям в данном случае затруднителен, т. к. при увеличении внутреннего давления в шине или радиальной нагрузки на диск максимальные значения интенсивности напряжений изменяются бессистемно, по сравнению со значениями повреждаемости. Это может быть связано как со сложным характером контактного взаимодействия и перераспределения напряжений в системе, так и особенностями конечно-элементного моделирования.

**Протектор шины.** Как и в асфальтобетонном покрытии, опасные объемы в протекторе шины концентрируются в области наибольшего контактного давления (рисунок 7).

В протекторе шины, с изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН, максимальные значения интенсивности напряжений увеличиваются в 1,4 раза, а повреждаемость в 3,3–3,6 раза (рисунок 8). Зависимость напряжений и повреждаемости от радиальной нагрузки имеет характер близкий к линейному, несмотря на зубчатый вид протектора. Это может быть обусловлено тем, что модель поведения материалов является упругой и изотропной.

Выбранный диапазон рассматриваемых внутренних давлений в шине практически не влияет на изменения максимальных напряжений и повреждаемости в резиновом протекторе. При увеличении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа напряжения практически не изменяются, а значения повреждаемости увеличиваются на 1–3 %, за исключением радиальной нагрузки  $F_H = 6$  кН, где повреждаемость увеличивается на 10–12 %.

Как видно из рисунков 6 и 8, повреждаемость в резине протектора примерно в 2,5 раза больше чем в асфальтобетонном покрытии. Большая по-

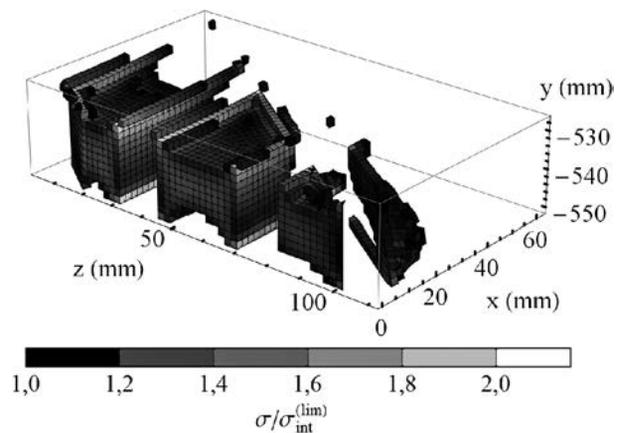
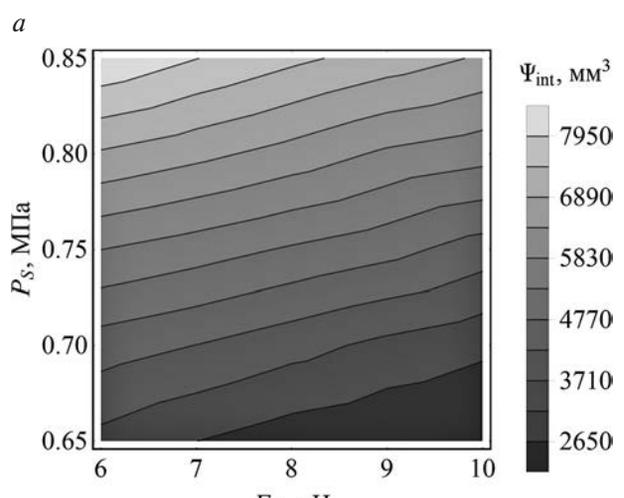
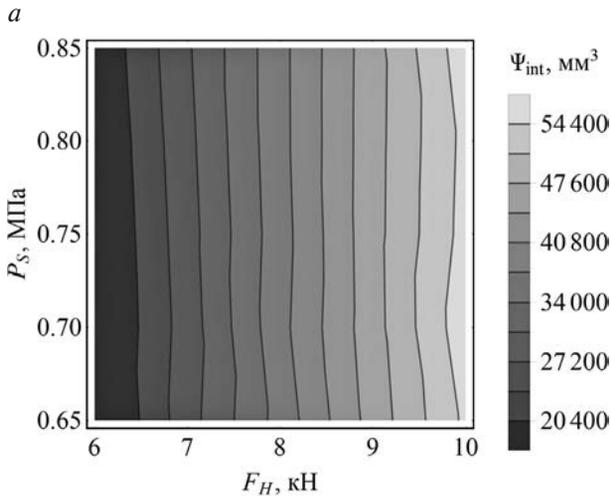
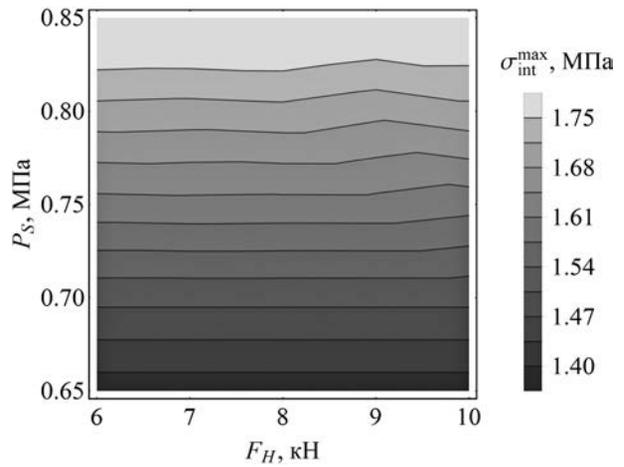
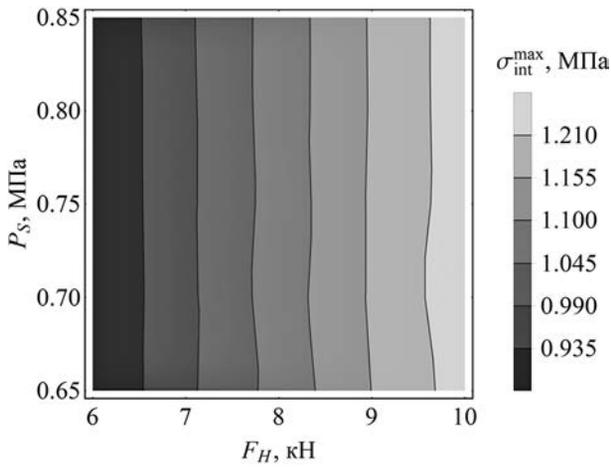
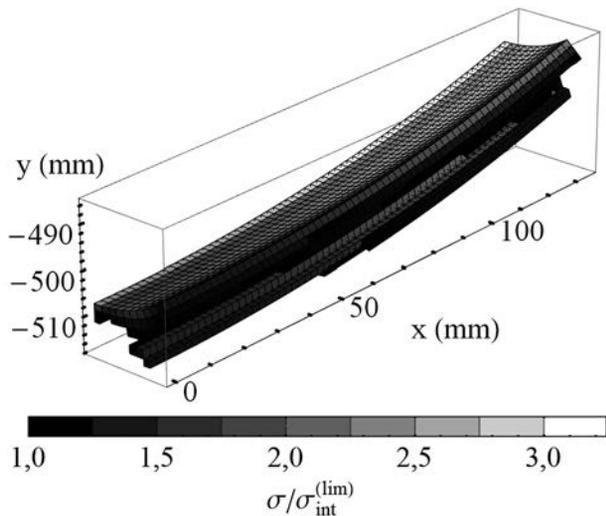


Рисунок 7 — Вид опасного объема в протекторе шины при  $P_S = 0,75$  МПа и  $F_H = 8$  кН  
Figure 7 — Type of damaged volume in the tire tread with  $P_S = 0,75$  МПа and  $F_H = 8$  кН



**Рисунок 8** — Максимальные напряжения (а) и повреждаемость (b) для протектора шины при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск  $F_H$  и внутреннего давления в шине  $P_S$   
**Figure 8** — Maximum stresses (a) and damageability (b) for the tire tread at different ratios of radial disk load  $F_H$  and internal tire pressure  $P_S$

**Рисунок 10** — Максимальные напряжения (а) и повреждаемость (b) для резины в области изгиба нейлонового каркаса при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск  $F_H$  и внутреннего давления в шине  $P_S$   
**Figure 10** — Maximum stresses (a) and damageability (b) for rubber in the bending area of the nylon frame at different ratios of radial load on the disk  $F_H$  and internal tire pressure  $P_S$



**Рисунок 9** — Вид опасного объема в резине в области изгиба нейлонового каркаса при  $P_S = 0,75$  МПа и  $F_H = 8$  кН  
**Figure 9** — Type of damaged volume in rubber in the bending area of the nylon frame with  $P_S = 0.75$  МПа and  $F_H = 8$  кН

вреждаемость протектора шины в области контакта, по сравнению с асфальтобетоном, обусловлена

тем, что жесткость асфальта гораздо выше жесткости резины. Кроме того, повреждаемость асфальтобетона концентрируется лишь в малой области контактного взаимодействия.

**Резина в области изгиба нейлонового каркаса.** Опасные объемы в резине под нейлоновым каркасом возникают в зоне ее взаимодействия с нейлоновым каркасом, а также внутри рассматриваемой области, за счет того, что данная область шины испытывает наибольшие изгибающие нагрузки при деформировании шины (рисунок 9).

С ростом радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН максимальные значения интенсивности напряжений практически остаются неизменными, а повреждаемость уменьшается примерно на 17–34 % (рисунок 10). Это связано со сложным характером перераспределения напряжений в данной области и взаимодействием с другими элементами шины, такими, как нейлоновый каркас и стальной бреккер.

При увеличении внутреннего давления в шине с 0,65 до 0,85 МПа максимальные напряжения увеличиваются в 1,3 раза, а повреждаемость примерно в 2,7–3,4 раза в зависимости от значения радиальной нагрузки на диск. По полученным значениям повреждаемости видно гораздо большее влияние радиальной нагрузки на диск на напряженное состояние системы, чем по максимальным значениям интенсивности напряжений.

**Заключение.** Проведено компьютерное моделирование пространственного НДС трибофатической системы «автомобильная шина–асфальтобетон» при различных значениях внутреннего давления в шине и радиальной нагрузки на диск.

Получены распределения напряжений в системе с учетом контактного взаимодействия между протектором шины и асфальтобетонным покрытием. На основании полученных данных была рассчитана повреждаемость по интенсивности напряжений в протекторе шины и асфальтобетонном покрытии в области их контакта, а также в резине в области изгиба нейлонового каркаса. Полученные значения повреждаемости в асфальтобетоне оказались примерно 2–2,5 раза меньше, чем в резиновом протекторе, в силу большей жесткости асфальтобетона.

Практически во всех областях с увеличением нагрузок максимальные значения интенсивности напряжений и повреждаемость возрастают, за исключением напряжений в асфальтобетоне, где их изменения происходят без явной зависимости от увеличения нагрузок. Однако при увеличении радиальной нагрузки на диск повреждаемость для резины под нейлоновым каркасом уменьшается, а максимальные напряжения остаются неизменными, что может быть вызвано сложным характером перераспределения напряжений в данной области.

При изменении внутреннего давления в шине с 0,65 до 0,85 МПа максимальные значения интенсивности напряжений и повреждаемость, в среднем, изменяются не более чем на 10 %, за исключением резины под нейлоновым каркасом, где данные характеристики увеличиваются примерно в 1,3 и 2,7–3,4 раза соответственно.

Показана эффективность анализа по повреждаемости, по сравнению с анализом по максимальным значениям интенсивности напряжений. Так, в асфальтобетоне значения повреждаемости показывают более явную зависимость от нагрузок, чем максимальные значения интенсивно-

сти напряжений, изменения которых несут бессистемный характер при увеличении нагрузок. При анализе резины в области изгиба нейлонового каркаса по максимальным значениям интенсивности напряжений не видно влияния радиальной нагрузки на диск, по сравнению с анализом по повреждаемости.

### Список литературы

1. Al-Qadi, I.L. 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. — No. 80. — Pp. 289–316.
2. Шейкина, В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины с жестким покрытием / Шейкина В.А. — Иваново: ИГЭУ, 2012.
3. Вайнштейн Е.В. 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(23). — Т. 23. — С. 39.
4. Ларин А.А. Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой с учетом наличия эксплуатационной деградации материала / А.А. Ларин, Ю.В. Арефин // Механіка та Машинобудування. — 2011. — № 2. — С. 52.
5. Lopez, I. Tire/road friction modeling / I. Lopez, B. de Bruijn, A.J.C. Schmeitz. — Eindhoven: TU/e, 2007. — 9 p.
6. Namjoo, M. Numerical simulation of tire/soil interaction using a verified 3D finite element model / M. Namjoo, H. Golbakhshi // Journal of Central South University of Technology. — 2014. — No. 21. — Pp. 817–821.
7. Щербаков, С.С. Напряженно-деформированное состояние многокомпонентной системы «диск — шина — асфальтобетон» при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине / С.С. Щербаков, Г.В. Грибовский // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ; пред. редкол. А.В. Чигарев. — Минск, 2018. — Вып. 33. — С. 281–286.
8. Грибовский, Г.В. Объемная повреждаемость трибофатической системы «диск — многокомпонентная шина — асфальтобетон» / Г.В. Грибовский, С.С. Щербаков // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ. — Минск, 2017. — Вып. 32. — С. 277–282.
9. Щербаков, С.С. Трибофатическая модель трехмерного напряженно-деформированного состояния и оценка повреждаемости системы «диск — многослойная шина — асфальтобетон» / С.С. Щербаков, Г.В. Грибовский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 5. — С. 203–206.
10. Щербаков, С.С. Объемная повреждаемость многокомпонентной системы «диск — автомобильная шина — асфальтобетон» при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине / С.С. Щербаков, Г.В. Грибовский // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ; пред. редкол. А.В. Чигарев. — Минск, 2019. — Вып. 34. — С. 307–313.
11. Sosnovskiy, L.A. Mechanothermodynamics / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov. — Springer, 2016. — 155 p.

GRIBOVSKII Gleb V.

Ph. D. Student

E-mail: mmf.gribovskiy@gmail.com

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 15 July 2019.

## VOLUMETRIC DAMAGEABILITY OF TRIBO-FATIGUE SYSTEM “CAR TIRE — ASPHALT CONCRETE” IN CONTACT INTERACTION AREA UNDER VARIOUS AXIAL LOADS ON TIRE

*Stress-strain state and volumetric damageability in contact vicinity of «car tire—asphalt concrete» tribo-fatigue system for the various combinations of internal pressure in the tire and axle load on the rim was considered. Stress-strain state of all system and volumetric damageability in contact area of tire and asphalt concrete for the various loads were calculated using finite-element modelling. In contact interaction vicinity was considered areas, where maximum stresses occur: asphalt concrete, tire tread and rubber under radial ply. Stress-strain analysis was considered using classical approach by maximum stress and tribo-fatigue approach by damaged volume. Values of maximum stress intensity and volumetric damageability on different values of radial load on the rim and internal pressure in tire are presented. Results of investigations show how values of maximum stress and volumetric damageability are changing by changing loads on car tire, where inner pressure increases from 0.65 to 0.85 MPa and radial load from 6 to 10 kN. A comparison of two different approaches for the analysis of stress-strain state of system elements has shown a greater effectiveness of the tribo-fatigue approach by damageability than the analysis by maximum stresses. The dependence of the volumetric damageability values on loads was more pronounced compared to the dependence of the maximum stress intensity, changes in which in some cases were haphazard when loads changed and did not reflect their influence on the stress-strain state.*

**Keywords:** tribo-fatigue system, stress-strain state, computer simulation, damaged volume, volumetric damageability

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-95-101>

### References

1. Al-Qadi I.L., Wang H. Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011, no. 80, pp. 289–316.
2. Sheykina V.A. *Matematicheskoe modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya aviatsionnoy shiny s zhestkim pokrytiem* [Mathematical modeling of the contact interaction of an aircraft tire with a hard surface]. Ivanovo, IGEU Publ., 2012 (in Russ.).
3. Vaynshteyn E.V., Vaynshteyn V.M., Nekhoroshkov P.A. Issledovanie izmeneniya kasatelno napryazheniy i vertikalnykh peremeshcheniy ot lesovoznogo avtopoezda v konstruktsii dorozhnoy odezhdy i zemlyanogo polotna [Research of change of tangents of tension and vertical movements from a log truck in a design of roadway surfacing and a road bed]. *Engineering journal of Don*, 2012, vol. 23, no. 4–2, p. 39 (in Russ.).
4. Larin A.A., Arefin Yu.V. Issledovanie zakonornostey deformirovaniya pnevmaticheskikh shin v kontakte s dorogoy s uchetom nalichiya ekspluatatsionnoy degradatsii materiala [Investigation of patterns of deformation of pneumatic tires in contact with the road, taking into account the presence of operational degradation of the material]. *Mekhanika ta Mashinobuduvannya*, 2011, no. 2, p. 52 (in Russ.).
5. Lopez I., de Bruijn B., Schmeitz A.J.C. *Tire/road friction modeling*. Eindhoven, TU/e, 2007. 9 p.
6. Namjoo M., Golbakhshi H. Numerical simulation of tire/soil interaction using a verified 3D finite element model. *Journal of Central South University of Technology*, 2014, no. 21, pp. 817–821.
7. Sherbakov S.S., Gribovskii G.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie mnogokomponentnoy sistemy “disk — shina — asfaltobeton” pri razlichnykh sootnosheniyyakh radialnoy nagruzki na disk i vnutrennego davleniya v shine [Stress-strain state of a multi-component system “disk — tire — asphalt concrete” at different ratios of radial load on the disk and internal tire pressure]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2018, iss. 33, pp. 281–286 (in Russ.).
8. Gribovskii G.V., Sherbakov S.S. Obemnaya povrezhdaemost tribofaticheskoy sistemy “disk — mnogokomponentnaya shina — asfaltobeton” [Volumetric damageability of tribo-fatigue system “disk — multi-component tire — asphalt concrete”]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2017, iss. 32, pp. 277–282 (in Russ.).
9. Sherbakov S.S., Gribovskii G.V. Tribofaticheskaya model trekhmernogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i otsenka povrezhdaemosti sistemy “disk — mnogosloynnaya shina — asfaltobeton” [Tribo-fatigue model of three-dimensional stress-strain state and damageability of “rim — multilayer tire — asphalt-concrete” system]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2017, iss. 5, pp. 203–206 (in Russ.).
10. Sherbakov S.S., Gribovskii G.V. Obemnaya povrezhdaemost mnogokomponentnoy sistemy “disk — avtomobilnaya shina — asfaltobeton” pri razlichnykh sootnosheniyyakh radialnoy nagruzki na disk i vnutrennego davleniya v shine [Volumetric damageability of the multi-component system “disk — car tire — asphalt concrete” at different ratios of radial load on the disk and internal tire pressure]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2019, iss. 34, pp. 307–313 (in Russ.).
11. Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *Mechanothermodynamics*. Springer, 2016. 155 p.