

УДК 539.3

С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, Белорусский государственный университет, Минск, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Г. В. ГРИБОВСКИЙ, Белорусский государственный университет, Минск, Е. А. ТЕМНИКОВ, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

## О МОДЕЛИРОВАНИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В СИСТЕМЕ ШИНА / АСФАЛЬТОБЕТОН

Проведено компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния многоэлементной системы диск / многослойная автомобильная шина / асфальтобетон, нагруженной внутренним давлением в шине и осевой силой, действующей на диск. Рассчитаны контактное взаимодействие между шиной и асфальтобетоном и пространственные распределения компонент напряжённо-деформированного состояния. Определены величины опасных объёмов и интегральной повреждаемости в шине и асфальтобетонном покрытии в окрестности их контактного взаимодействия.

**Введение.** Известен ряд работ, посвящённых аналитическому и компьютерному моделированию напряжённо-деформированного состояния отдельных элементов системы диск/шина/асфальтобетон [1–3]. Однако задача оценки одновременных контактных взаимодействий элементов системы, их трехмерного напряжённо-деформированного состояния и состояния объемной повреждаемости остаётся не полностью исследованной.

Целью работы является определение с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования указанных выше состояний многокомпонентной системы диск/шина/асфальтобетон.

Расчёт повреждаемости основан на использовании модели деформированного твёрдого тела с опасным объёмом. В соответствии с данной моделью опасным объёмом является пространственная область нагруженного тела, в которой действующие напряжения превышают предельные [4].

**Построение геометрии и задание механических характеристик.** Для проведения расчётов в пакете ANSYS Workbench была взята готовая геометрическая модель грузовой шины радиуса 22,5 дюйма GoodYear 12R22.5 с диском [5]. Из данной модели были удалены зубья протектора, которые не входят в контакт с асфальтом, и некоторые другие элементы, которые не давали бы практически значимых для анализа результатов. Это позволило упростить построение конечно-элементной сетки, а также ускорить время расчёта. Асфальтобетонное покрытие моделировалось прямоугольным параллелепипедом размером 350x100x175 мм. Для ускорения расчётов, в силу симметрии основной модели, использовалась ее четверть (рисунок 1).

По сравнению с [6], где рассматривалась однородная шина, в настоящей работе шина моделируется как многослойная система. В модель из работы [6] были добавлены основные слои, свойственные реальным шинам, такие как два слоя стального брекера, нейлоновый каркас, бортовое кольцо, резиновый протектор [7] (см. рисунок 1 и таблицу 1).

Для упрощения построения конечно-элементной сетки шина моделировалась несколькими объемными фигурами.

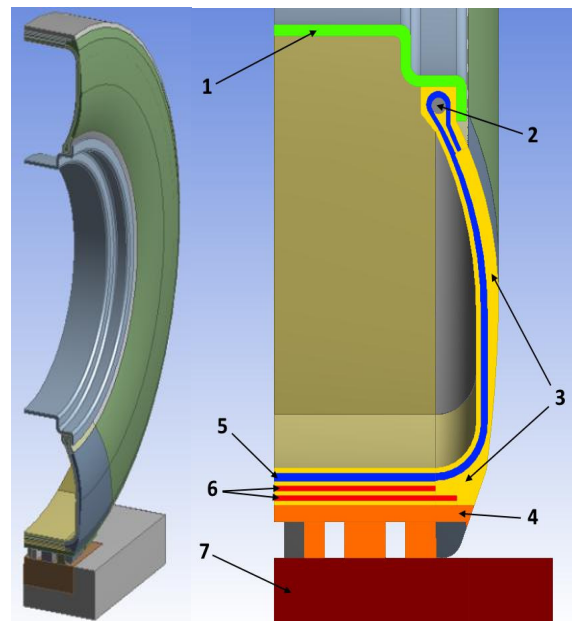


Рисунок 1 – Геометрическая модель системы и схематичное обозначение материалов

Таблица 1 – Механические характеристики элементов модели

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

**Конечно-элементное разбиение и граничные условия.** В работе основное внимание уделяется трехмерному напряженно-деформированному состоянию и объёмной повреждаемости в зоне контакта. Поэтому в данной области (по сравнению с остальной моделью) в направлении действия радиальной нагрузки была задана более мелкая расчетная сетка (рисунок 2).

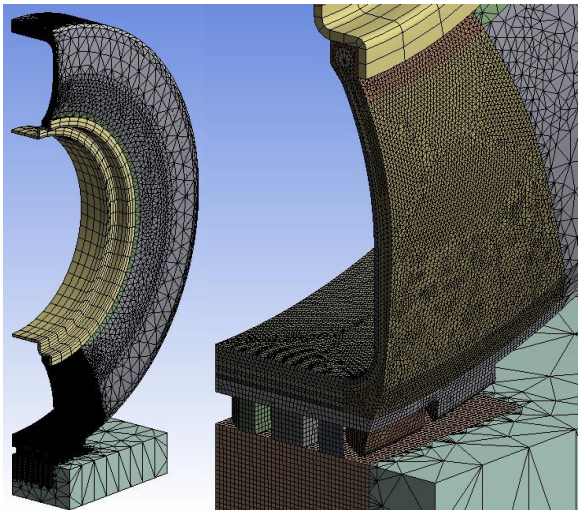


Рисунок 2 – Конечно-элементное разбиение модели

Для более точной конечно-элементной оценки напряженно-деформированного состояния в зоне контакта шины и асфальтобетона было проведено субмоделирование данной зоны. Оно осуществлялось посредством переноса перемещений, полученных из расчета полной модели системы диск/шина/асфальтобетон, на грани субмоделируемой области, представленной на рисунке 3, и последующего решения дополнительной граничной задачи для данной области.

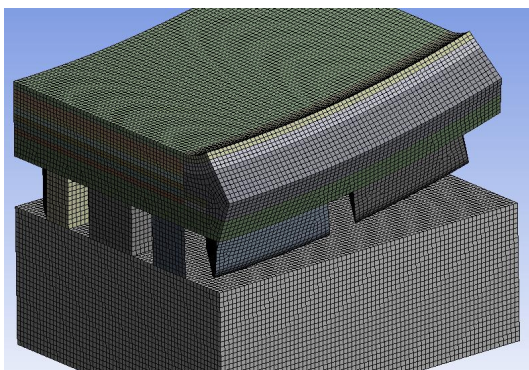


Рисунок 3 – Конечно-элементное разбиение субмоделируемой области

На поверхностях сечений модели в плоскостях  $XY$  и  $YZ$  были заданы условия симметрии по оси  $Z$  и  $X$  соответственно (рисунок 4).

В системе диск/шина/асфальтобетон были заданы следующие граничные условия (рисунок 5):

1) внутреннее давление  $q$  в шине на поверхности  $S$ :

$$q|_S = 850 \text{ кПа}; \quad (1)$$

2) радиальная нагрузка  $F$ , направленная вдоль оси  $Y$ , приложенная к поверхности диска  $H$ :

$$F|_S = -2500 \text{ Н}; \quad (2)$$

3) основание асфальтобетонного покрытия жестко зафиксировано во всех направлениях;

4) на поверхностях взаимодействия элементов (слоев) шины были заданы условия сцепления;

5) на поверхностях взаимодействия протектора шины и асфальтобетона были заданы условия контактного взаимодействия с трением.

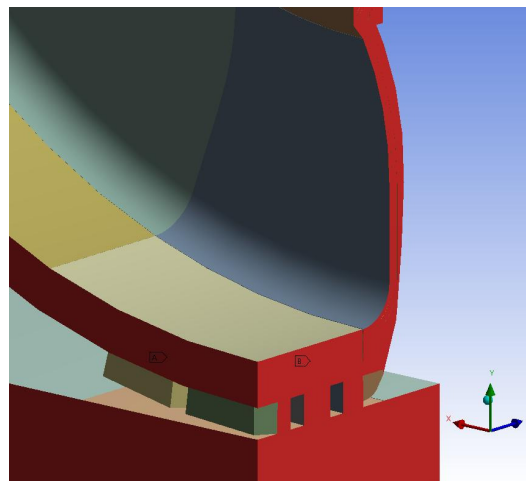


Рисунок 4 – Области симметрии модели

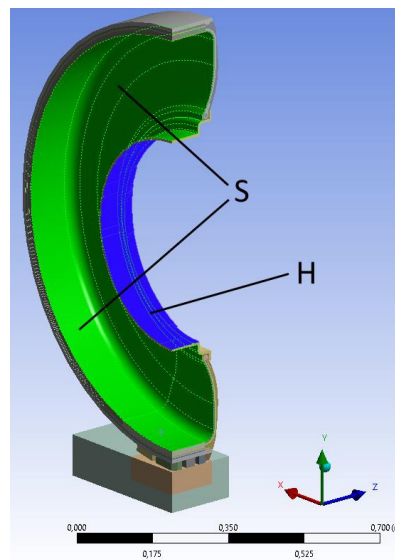


Рисунок 5 – Области нагружения

Величины нагрузок для шины были взяты из нормативной литературы производителя [8].

Коэффициенты трения сталь – резина и резина – асфальтобетон, равные 0,6, были взяты из справочной литературы [9, 10].

**Напряжённо-деформированное состояние.** Из рисунка 6 видно, что в системе максимальная интенсивность напряжений возникает в диске (примерно 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 (рисунки 9–10). Схожий характер имеют и распределения первых главных напряжений.

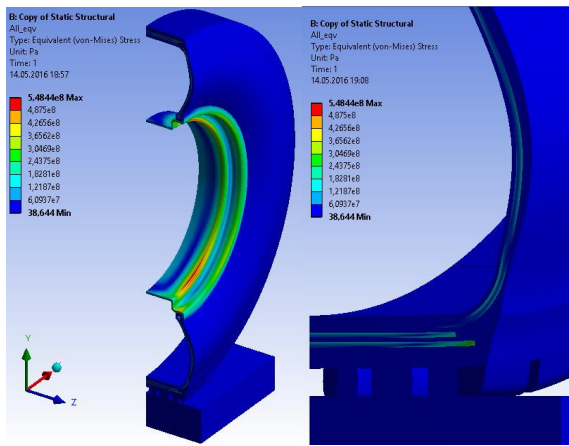


Рисунок 6 – Интенсивность напряжений во всей системе

Наибольшая интенсивность напряжений в резине, показанная на рисунке 7, имеет место в областях контакта с диском (примерно 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.

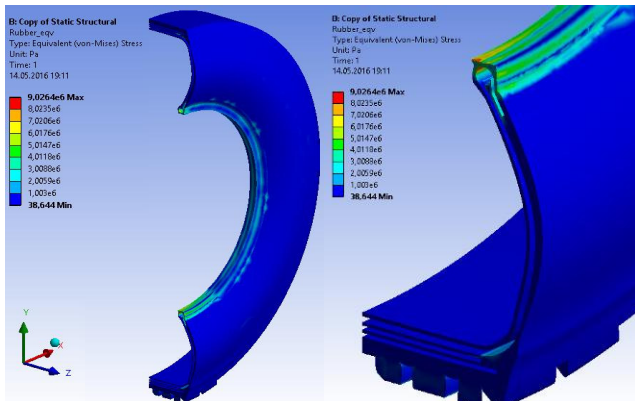


Рисунок 7 – Интенсивность напряжений в резине

Наибольшая интенсивность напряжений в нейлоновом каркасе, показанная на рисунке 8, образуется в зонах взаимодействия с бортовым кольцом (примерно 390 МПа), наибольшего изгиба шины и в бортовой области (примерно 260 МПа), где нейлоновый каркас испытывает наибольшие перемещения под действием силы  $F$  внутреннего и давления шины, сохраняя её форму.

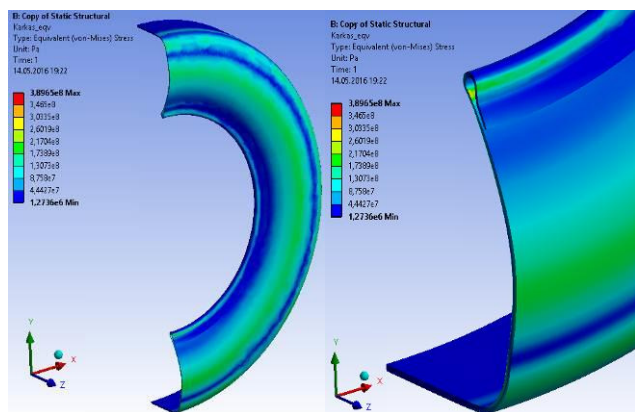


Рисунок 8 – Эквивалентные напряжения нейлонового каркаса

В нижнем более широком стальном корде наибольшие напряжения порядка 419 МПа образуются на его внешнем крае из-за значительного изгиба шины в данной зоне (рисунок 9).

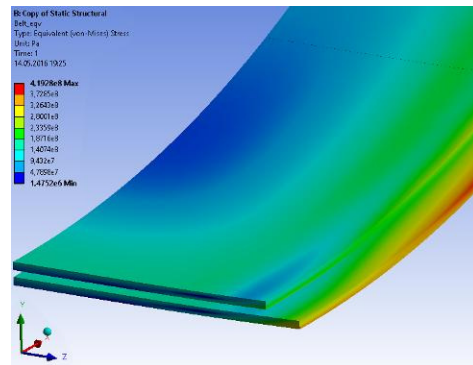
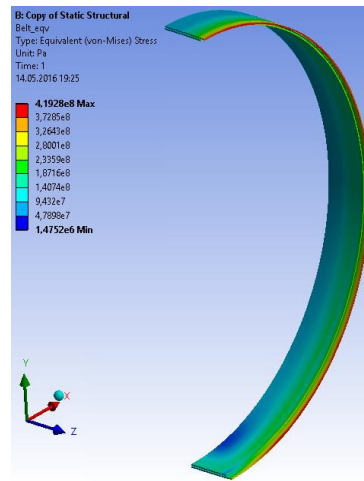


Рисунок 9 – Интенсивность напряжений в стальном брекере

Наибольшая интенсивность напряжений (см. рисунок 10) и контактное давление (рисунки 11–12) сосредоточены ближе к центру асфальтобетонного покрытия, достигая величин 1,8 и 3,4 МПа соответственно. В асфальтобетоне, как и в резине, максимальные напряжения на 1,5–2 порядка ниже по сравнению с другими материалами системы.

Выше было указано, что в резине напряжения гораздо меньше, чем в других материалах системы.

С другой стороны, деформации в резине примерно на порядок больше (рисунок 13), т.к. резина имеет значительно меньшую жёсткость, чем диск и брекер.

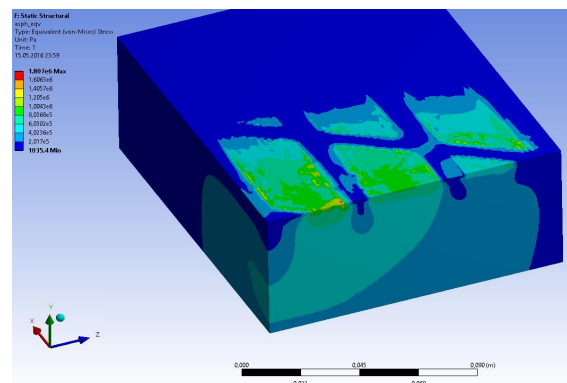


Рисунок 10 – Интенсивность напряжений в асфальтобетоне

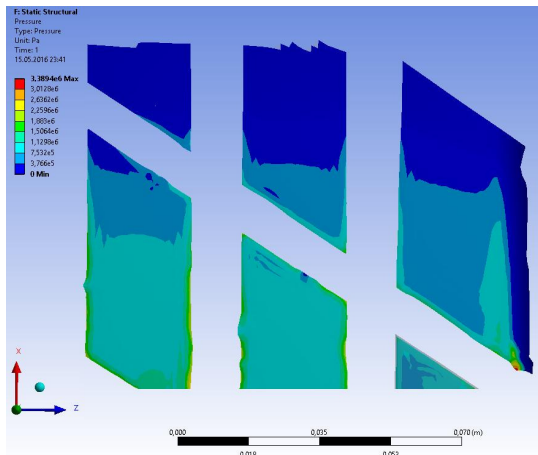


Рисунок 11 – Контактное давление

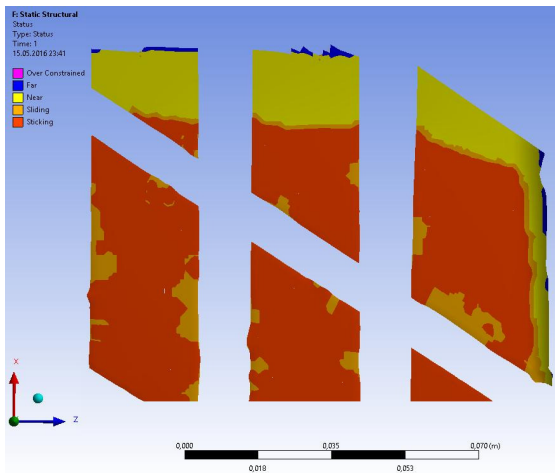


Рисунок 12 – Зона контакта шины и асфальтобетона

Наибольшие деформации резина испытывает в зоне контакта с диском и асфальтобетоном, а также в области сгиба нейлонового каркаса под диском.

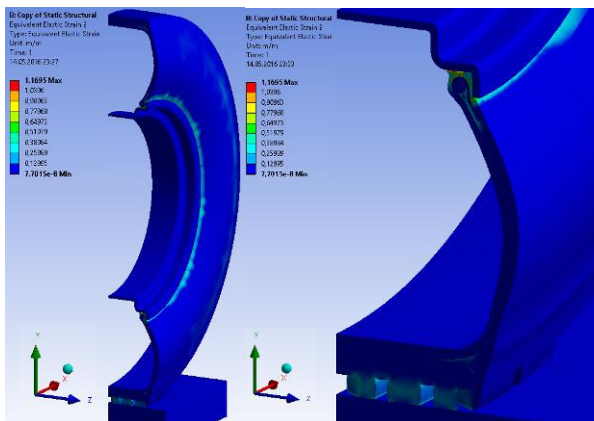


Рисунок 13 – Интенсивность деформации во всей системе

**Объёмная повреждаемость.** Расчёт интегральных показателей повреждаемости основан на использовании модели деформированного твёрдого тела с опасным объёмом. В соответствии с данной моделью опасным объёмом является пространственная область нагруженного тела, в которой действующие напряжения превышают предельные:

$$\Psi_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_c^{(*\text{lim})}}; \quad (3)$$

$$V_c = \{ \Psi_c \geq 1, dV \subset V_k \}, \quad (4)$$

где  $c = 3$  – третьи главные напряжения;  $V_k$  – рабочий объём.

Интенсивность напряжений была выбрана для расчёта опасных объёмов, поскольку она позволяет учитывать касательные поверхностные усилия (силу трения), а третьи главные напряжения наиболее близки на поверхности к сжимающему контактному давлению.

Формулы для расчёта опасных объёмов и их интегральной повреждаемости имеют вид [4]

$$V_c = \iiint_{\Psi_c \geq 1} dV; \quad (5)$$

$$\Psi_c = \iiint_{\Psi_c \geq 1} \Psi_c dV. \quad (6)$$

В работе рассматривается опасный объём в области контакта шины и асфальтобетона, которые работают в условиях фрикционной усталости. Предел фрикционной усталости был выбран равным 0,5 МПа.

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

Как видно из рисунков 14–19, опасные объёмы образуются непосредственно в областях наибольшего контактного давления в области взаимодействия шины с асфальтобетоном. Шкала под рисунками описывает уровень локальной повреждаемости (3) в опасном объёме (4), т.е. во сколько раз действующие в конечном элементе напряжения превышают предельные, равные 0,5 МПа.

Как видно из рисунков 14–19 и таблиц 2–3, опасные объёмы и повреждаемость в резине протектора примерно в 2–2,5 раза больше, чем в асфальтобетоне. Большая повреждаемость резины протектора, по сравнению с асфальтобетоном, в области контакта обусловлена тем, что жёсткость асфальта гораздо выше жёсткости резины. Кроме того, повреждаемость асфальтобетона концентрируется лишь в малой области контактного взаимодействия.

В связи с тем, что в работе моделировалась четверть шины в соответствии с условиями симметрии, в таблицах 2–3 приведены опасные объёмы и повреждаемость, увеличенные в 4 раза.

Таблица 2 – Опасные объёмы в области контакта

Тип опасных объёмов	Опасный объём в шине, мм <sup>3</sup>	Опасный объём в асфальте, мм <sup>3</sup>
$V_{int}$	168 238,4	77 540,8
$V_3$	322 635,2	139 151,6

Таблица 3 – Повреждаемость в области контакта

Тип опасных объёмов	Опасный объём в шине, мм <sup>3</sup>	Опасный объём в асфальте, мм <sup>3</sup>
$V_{int}$	221 018,0	91 878,4
$V_3$	477 016,0	170 961,6

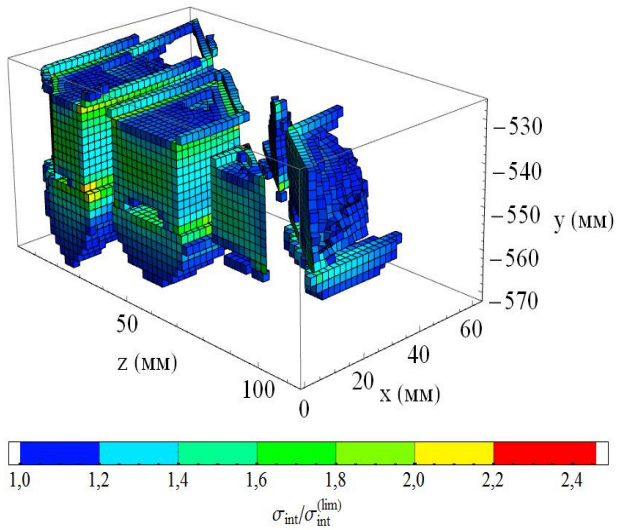


Рисунок 14 – Опасный объём по интенсивности напряжений  $V_{int}$  в области контакта шины и асфальтобетона

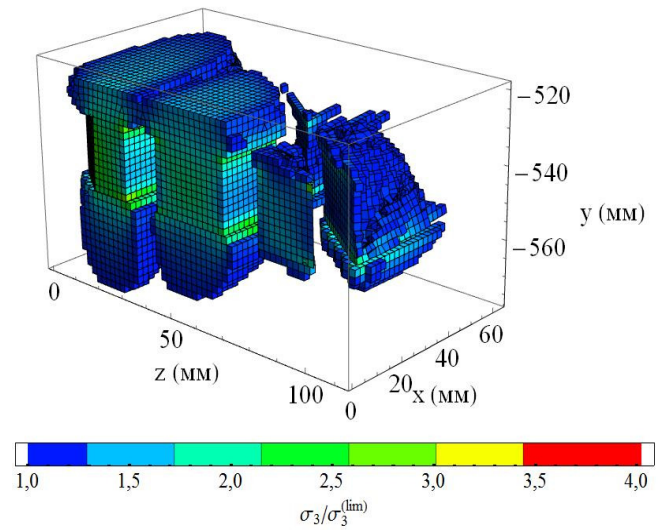


Рисунок 17 – Опасный объём по третьим главным напряжениям  $V_3$  в области контакта шины и асфальтобетона

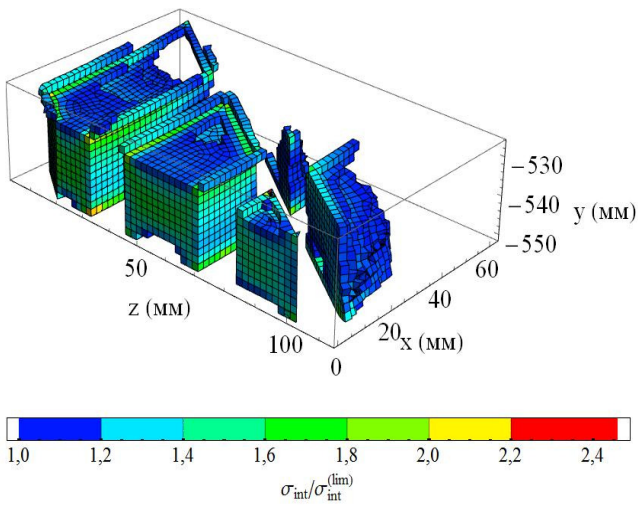


Рисунок 15 – Опасный объём по интенсивности напряжений  $V_{int}$  в протекторе

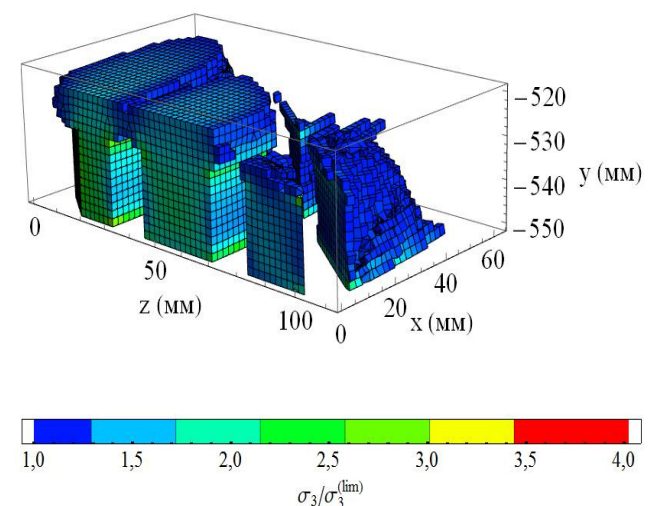


Рисунок 18 – Опасный объём по третьим главным напряжениям  $V_3$  в протекторе

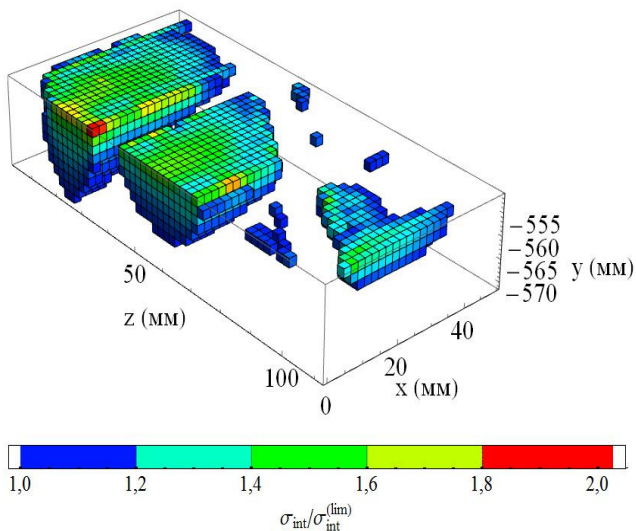


Рисунок 16 – Опасный объём по интенсивности напряжений  $V_{int}$  в асфальтобетоне

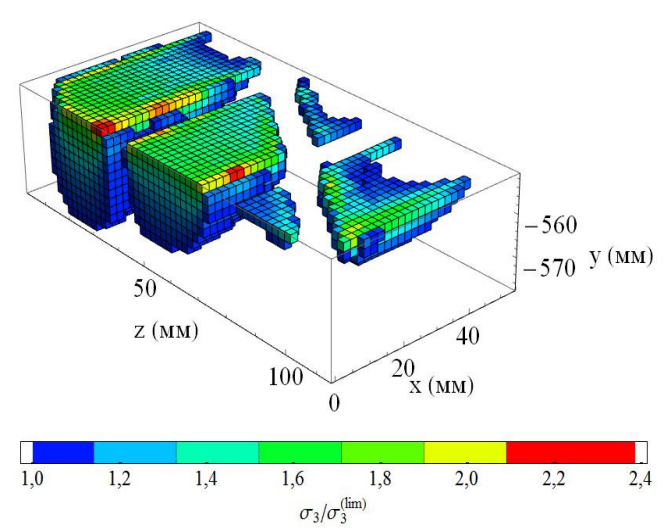


Рисунок 19 – Опасный объём по третьим главным напряжениям  $V_3$  в асфальтобетоне

**Заключение.** Проведено компьютерное моделирование трехмерного напряжённо-деформированного состояния многокомпонентной системы диск / 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 объемов в шине и асфальтобетонном покрытии в зоне контакта. Полученные опасные объёмы в асфальтобетоне оказались примерно в 2–2,5 раза больше чем в шине в силу большей жёсткости асфальтобетона. При этом октаэдрические опасные объёмы  $V_{int}$  в шине и асфальтобетоне оказались примерно в 2 раза меньше, чем опасные объёмы, рассчитанные по третьему главному напряжению  $V_3$ .

#### Список литературы

1 **Al-Qadi, Imad 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. – № 80. – P. 289–316.

Получено 10.02.2016

**S. S. Sherbakov, L. A. Sosnovskiy, G. V. Gribovskiy, E. A. Temnikov.** About modeling of contact interaction, stress-strain state and damageability in the tire / asphalt-concrete system.

Computer simulation of stress-strain state of multielement rim/ multilayer car tire/ asphalt-concrete system was made for the action of internal pressure in the tire and axle load on the rim. Contact interaction between tire and asphalt-concrete and spacial distributions of stress-strain state components were obtained. Dangerous volumes and integral damageability of tire and asphalt-concrete in the neighborhood of their contact area were calculated.

2 **Шейкина, В. А.** Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины с жёстким покрытием / В. А. Шейкина. – Иваново : ИГЭУ, 2012.

3 **Вайнштейн, Е. В.** Исследования 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.** Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2011. – 407 с.

5 22.5" Aluminum Truck Wheel & 12R22.5 Tire // GrabCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://grabcad.com/library/22-dot-5-aluminum-truck-wheel-and-12r22-dot-5-tire>. – Дата доступа : 19.10.2014.

6 **Щербаков, С. С.** Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния и объемной повреждаемости системы диск / автомобильная шина / асфальтобетон / С. С. Щербаков, Г. В. Грибовский // Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. статей. – Вып. 31. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 351–355.

7 **Lopez, I.** Tire/road friction modeling / I. Lopez, B. de Bruijn, A. J. C. Schmeitz. – Eindhoven : TU/e, 2007. – P. 9.

8 Goodyear truck tires. Technical data book / Goodyear Dunlop Tires Operations S. A. – 2011. – P. 37.

9 **Шмелёв, А.** Трение и его роль в креплении грузов / А. Шмелёв // Автоперевозчик. – 2010. – № 6. – С. 82.

10 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.