

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ И ОБЪЕМНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СИСТЕМЫ «АВТОМОБИЛЬНАЯ ШИНА–АСФАЛЬТОБЕТОН» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СООТНОШЕНИЯХ РАДИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ДИСК И ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ В ШИНЕ

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

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. В настоящее время в сфере машиностроения большое значение играет конечно-элементное моделирование сложных механических систем и их комплексного взаимодействия. Компьютерное моделирование позволяет рассмотреть различные ситуации и комбинации силовых воздействий на проектируемую 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 системы «автомобильная шина–асфальтобетон». Конечно-элементное моделирование позволяет рассчитать трехмерное напряженно-деформированное состояние (НДС) системы, что необходимо для дальнейшего расчета повреждаемости и износа как протектора шины, так и асфальтобетонного покрытия, работающих в условиях контактной, механической и фрикционной усталости.

Большое количество исследований посвящено компьютерному или аналитическому моделированию НДС рассматриваемой системы, однако большинство из них сконцентрировано на отдельных элементах системы, не учитывая их взаимодействия во всей полноте. Так, например, в статье [1] проводится полное моделирование основных слоев шины, моделируется контактное взаимодействие между шиной и асфальтобетоном, 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. В статьях [4,5] моделируется полное контактное взаимодействие многослойных шин с асфальтобетонным покрытием, однако в [4] рассматривается только НДС боковины шины, а в [5] рассматривается только распределение напряжений в грунте и перемещение оси шины при взаимодействии с простым видом протектора и не моделируется воздействие диска на шину.

Целью данной работы, по сравнению с предыдущими исследованиями, с помощью конечно-элементного моделирования комплексно, с учетом основных элементов системы, оценить трехмерное НДС и состояние объемной повреждаемости системы «автомобильная шина–асфальтобетон» при различных соотношениях 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 была рассмотрена геометрическая модель стального диска и грузо-

вой шины с ромбовидным протектором радиусом 22,5 дюйма с учетом основных конструктивных элементов (таблица рис. 1, а), а также асфальтобетонное покрытие в виде прямоугольного параллелепипеда [6]. Для оптимизации расчетного времени и в силу осесимметричности модели была использована четвертая часть от полной модели.

Таблица 1 – Механические характеристики элементов системы

Элементы системы	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	$8 \cdot 10^6$	0,49	1100
4. Резиновый протектор	$4 \cdot 10^6$	0,49	1100
5. Нейлоновый каркас	$9 \cdot 10^{10}$	0,3	1500
6. Стальной брекер	$1,7 \cdot 10^{11}$	0,3	1100
7. Асфальтобетон	$14,77 \cdot 10^8$	0,1	2510

В области контакта шины и асфальтобетона была задана конечно-элементная сетка с меньшим шагом по пространству для получения гладких распределений компонент НДС и дальнейшего определения объемной повреждаемости. (рисунок 1,б). Более подробно о конечно-элементном разбиении модели написано в предыдущих работах [6–8].

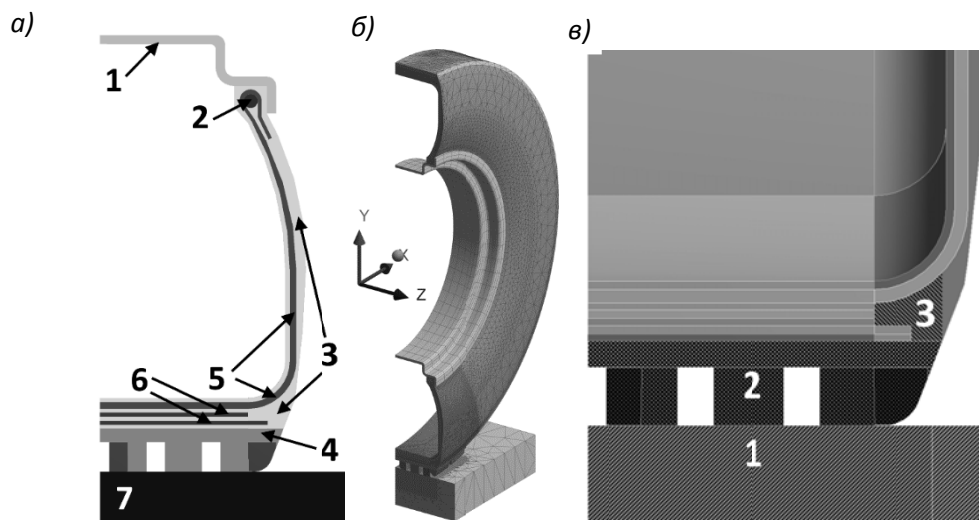


Рис. 1. Схематичное обозначение материалов (а), конечно-элементное разбиение всей модели (б), рассматриваемые области для анализа повреждаемости (в):
 1 – резиновый протектор, 2 – асфальтобетон,
 3 – резина в области изгиба нейлонового каркаса

Граничные условия. Более подробная информация об особенностях задания граничных условий в рассматриваемой модели приведено в работах [8, 9]. В общем, на систему были заданы следующие изменяющиеся нагрузки:

- внутреннее давление P_S в шине, которое изменялась от 0,65 до 0,85 МПа;
- радиальная нагрузка F_H на диск, которое изменялось от 6 до 10 кН.

Метод расчета объемной повреждаемости. Расчет интегральных показателей повреждаемости основан на использовании модели деформированного твердого тела с опасным объемом [10]. В соответствии с данной моделью, опасным объемом является пространственная область нагруженного тела, в которой действующие напряжения превышают предельные [10, 11]:

$$\Psi_{\text{int}} = \sigma_{\text{int}} / \sigma_{\text{int}}^{(\text{lim})}, \quad (1)$$

$$V_{\text{int}} = \{ \Psi_{\text{int}} \geq 1, dV \subset V_k \} \quad (2)$$

где σ_{int} – интенсивность напряжений, V_k – рабочий объем. Формулы для расчета опасных объемов и их интегральной повреждаемости имеют следующий вид:

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

$$\Psi_{\text{int}} = \iiint_{\Psi_{\text{int}}(V) \geq 1} \Psi_{\text{int}}(V) dV \quad (4)$$

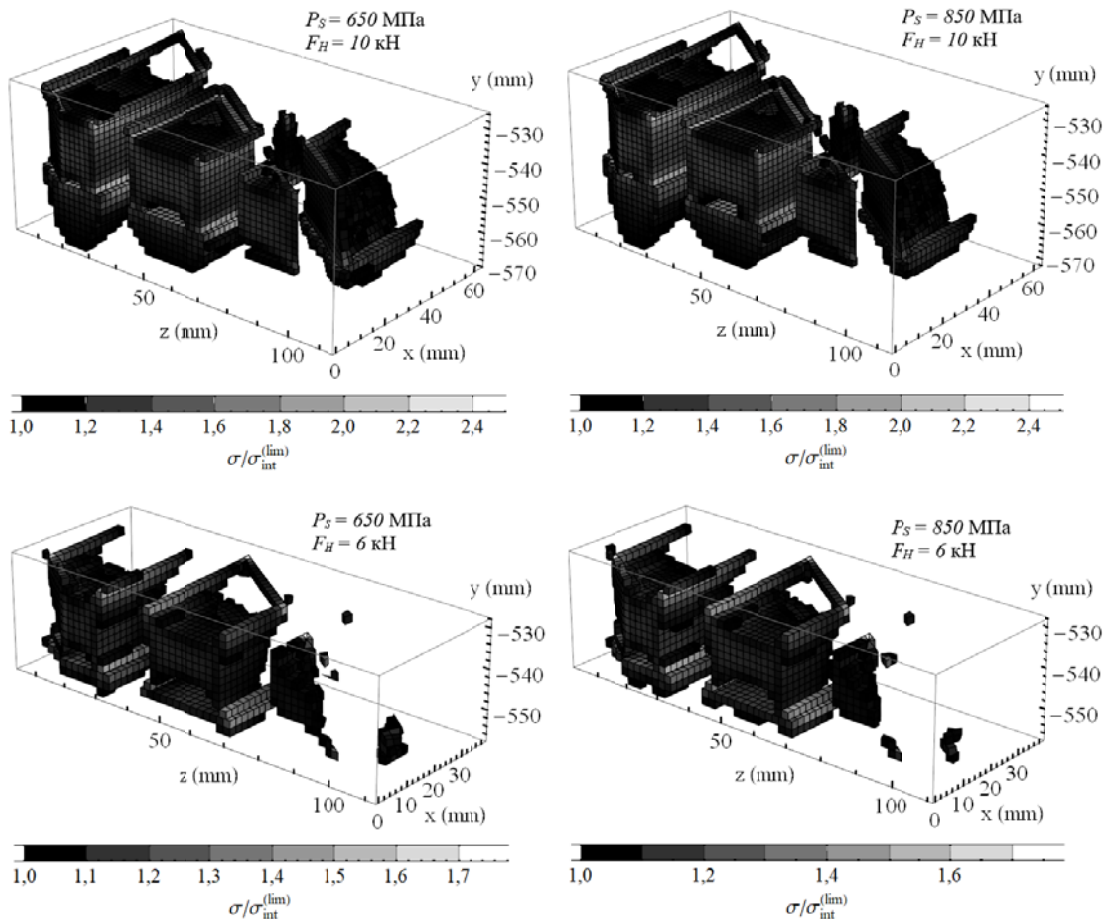


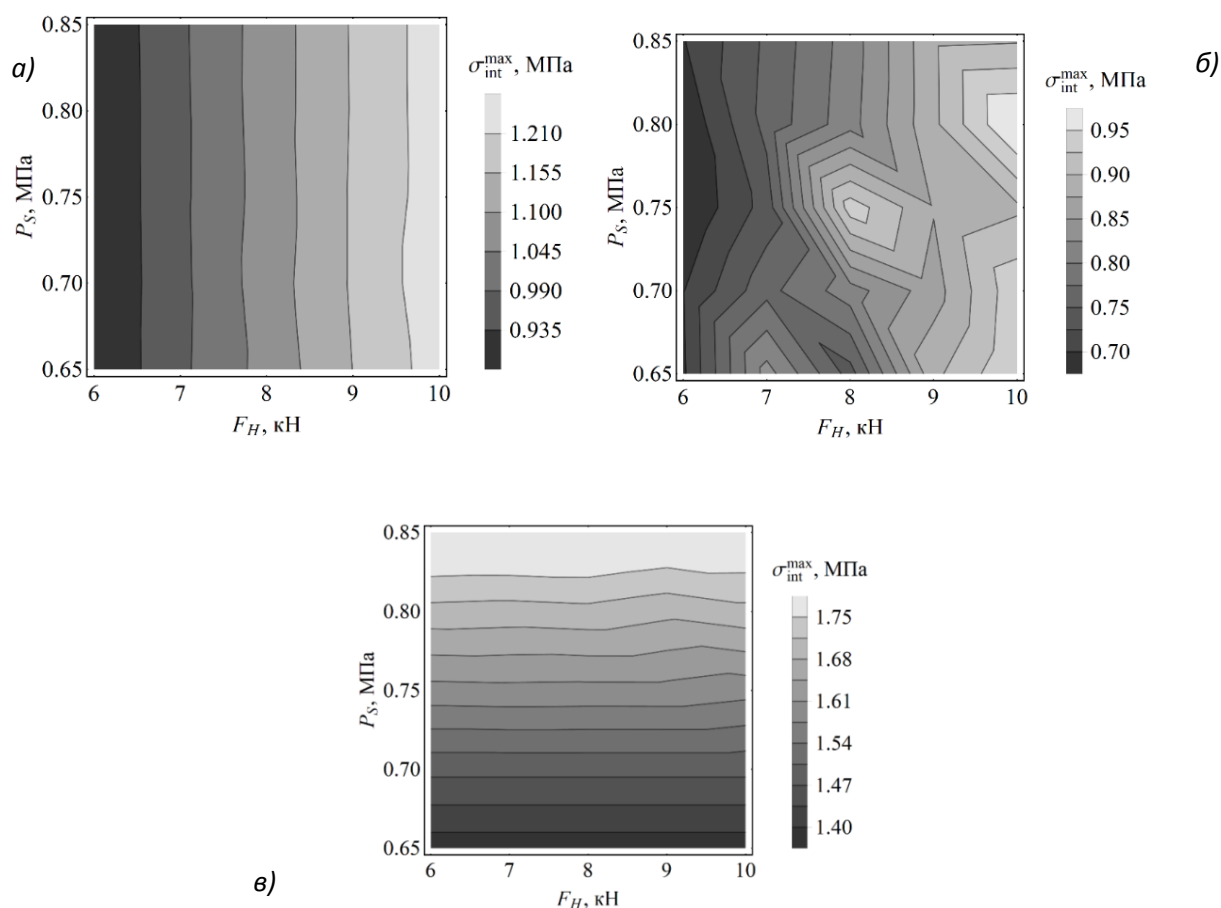
Рис. 2. Вид опасных объемов в протекторе шины и асфальтобетоне при минимальных и максимальных значениях радиальной нагрузки на диск F_H и внутреннего давления в шине P_S

В работе рассматриваются опасные объемы в области контакта шины и асфальтобетона, которые работают в условиях фрикционной усталости. Предел допускаемых

напряжений $\sigma_{\text{int}}^{(\text{lim})}$ для условий фрикционной усталости в зоне контакта был принят равным 0,5 МПа, а для остальных резиновых частей системы – 1 МПа. Пример опасных объемов при минимальных и максимальных значениях нагрузок представлен на рис. 2.

Протектор шины. В протекторе шины, с изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН, максимальные напряжения увеличиваются в 1,4 раза (рис. 3 а). Опасные объемы в этом случае увеличиваются в 2,7–3 раза, а повреждаемость в 3,3–3,6 раза (рис. 4а). Зависимость рассматриваемых значений 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.

Увеличение внутренних давлений в шине в выбранном диапазоне нагрузок практически не влияет на изменения рассматриваемых значений в резиновом протекторе. В основном, при увеличении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа максимальные напряжения практически не изменяются, а опасные объемы и повреждаемость увеличиваются на 1–3%, и только при радиальной нагрузке на диск $F_H = 6$ кН рассматриваемые характеристики увеличиваются на 10–12%.

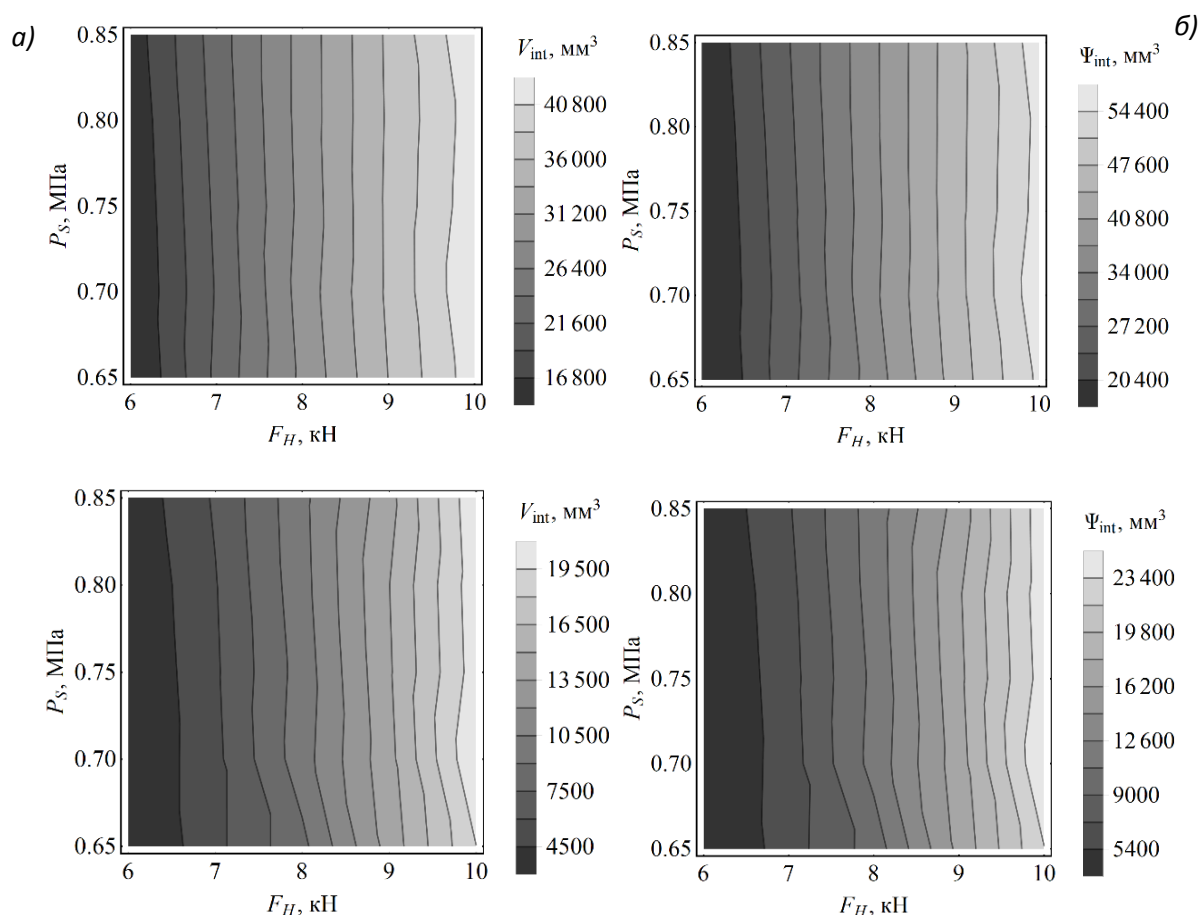


"Рис. 3. Максимальные значения интенсивности напряжений $\sigma_{\text{int}}^{\text{max}}$ в протекторе шины (а),
 "" фальтобетоне (б) и в резине в области изгиба нейлонового каркаса (в) при различных
 значениях радиальной нагрузки на диск F_H и внутреннего давления в шине P_S

Асфальтобетон. С изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН максимальные значения интенсивности напряжений увеличиваются нелинейно, примерно на 28–46%, достигая максимума при $F_H = 10$ кН (рис. 2, б). Однако, исключе-

ние наблюдается при $P_S = 0,75$ МПа, где наибольшее значение максимальной интенсивности напряжений достигается при $F_H = 8$ кН. Опасные объемы и повреждаемость же в асфальтобетоне увеличивается нелинейно в 6–7,5 раз и в 6,6–8,2 раза соответственно (рис. 4, б). Значительно увеличение значений опасных объемов и повреждаемости может быть связано с тем, что контактное давление в асфальтобетоне концентрируется в малой области контактного взаимодействия с шиной, т.е. в зубцах 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 увеличения внутреннего давления в шине. В то же время опасные объемы и повреждаемость в асфальтобетоне возрастают на 3–30 % в зависимости от значения радиальной нагрузки на диск. Наименьшие изменения наблюдаются при $F_H = 9$ кН, а максимальные при $F_H = 6$ кН.



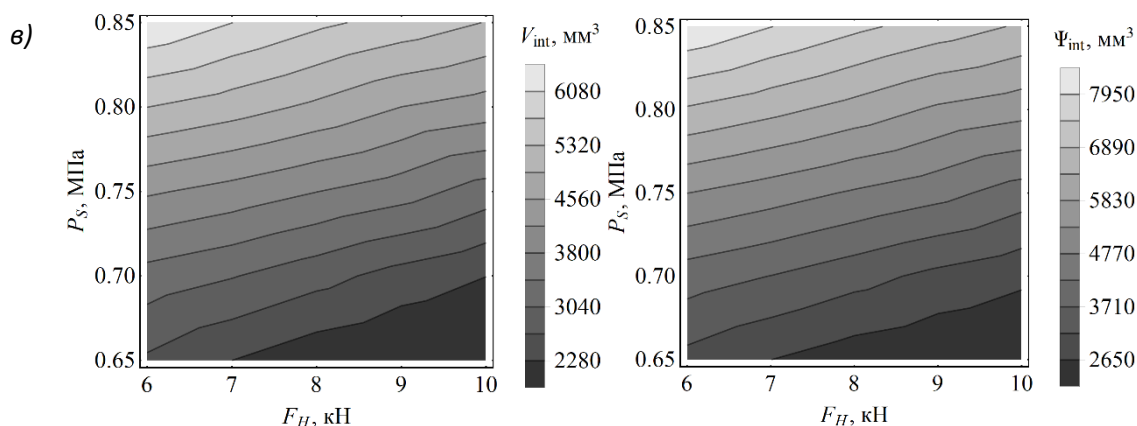


Рис. 4. Опасные объемы V_{int} и повреждаемость Ψ_{int} для протектора шины (а), асфальтобетона (б) и резины в области изгиба нейлоновым каркасом (в) при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск F_H и внутреннего давления в шине P_S

Резина в области изгиба нейлонового каркаса. С ростом радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН максимальные значения интенсивности напряжений практически остаются неизменными (рис. 3, в), а опасные объемы и повреждаемость уменьшаются примерно на 17–34 % (рис. 4, в). 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 опасные объемы и повреждаемость примерно в 2,4–3,1 и 2,7–3,4 раза соответственно в зависимости от значения радиальной нагрузки на диск. По полученным значениям повреждаемости и опасным объемам видно гораздо большее влияние радиальной нагрузки на диск на напряженное состояние системы, чем по максимальным значениям интенсивности напряжений.

Заключение. В данной работе было проведено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния системы «автомобильная шина–асфальтобетон» при различных комбинациях внутреннего давления в шине и радиальной нагрузки на диск.

Расчитаны пространственные распределения НДС в системе с учетом контактного взаимодействия протектора шины с асфальтобетонным покрытием при различных нагрузках. На основании полученных распределений напряжений был проведен расчет опасных объемов и повреждаемости по интенсивности напряжений в протекторе шины и асфальтобетонном покрытии в области контакта, а также в резине в области изгиба нейлонового каркаса. Полученные опасные объемы в асфальтобетоне оказались примерно 2–2,5 раза меньше, чем в резиновом протекторе, в силу большей жесткости асфальтобетона.

Почти во всех областях с увеличением радиальной нагрузки на диск или внутреннего давления в шине максимальные значения интенсивности напряжений, опасные объемы 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 в области изгиба нейлонового каркаса уменьшается, а максимальные напряжения остаются неизменными, что может быть вызвано сложным характером перераспределения напряжений в данной области.

При увеличении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа максимальные значения интенсивности напряжений, опасные объемы и повреждаемость, в среднем, изменяются не более чем на 10%, за исключением резины в области изгиба нейлонового каркаса, где данные характеристики увеличиваются примерно в 1,3, 2,4–3,1 и 2,7–3,4 раза соответственно.

Показана эффективность анализа по опасным объемам и повреждаемости, по сравнению с анализом по максимальным значениям интенсивности напряжений. Так, в асфальтобетоне значения повреждаемости показывают более явную зависимость от нагрузок, чем по максимальным напряжениям, 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 опасным объемам и повреждаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Imad, L. Al-Qadi. Prediction of Tire-Pavement Contact Stresses and Analysis of As-phalt 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 жестким покрытием / В.А. Шейкина. – 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. – 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. *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. – №21. – P. 817-821.*
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: междунар. научно-техн. сборник. Вып. 31. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 351 – 355.*
7. *Щербаков, С.С. Трехмерное напряженно-деформированное состояние и повреждаемость системы “многослойная шина–асфальтобетон” / С.С. Щербаков, Г.В. Грибовский // Сборник научных трудов «Актуальные вопросы машиноведения». – Вып. 5. Минск: ОИМ НАН РБ, 2017 – С. 203–207*
8. *Грибовский, Г. В. Объемная повреждаемость трибофатической системы диск– многокомпонентная шина–асфальтобетон / Г. В. Грибовский, С. С. Щербаков // Теоретическая и прикладная механика: междунар. научно-техн. сборник. Вып. 32. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 277–282.*
9. *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. научно-техн. сборник. Вып. 34. Минск: БНТУ, 2019. – С. 281–286.*

10. Щербаков, С.С. *Механика трибофатических систем* / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.

11. Sosnovskiy, L. A. / *Mechanothermodynamics* / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov – Springer, 2016. – 155 p.

12. 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. научно-техн. сборник. – Вып. 33. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 281–286.*