

ОБЪЁМНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «ДИСК–АВТОМОБИЛЬНАЯ ШИНА–АСФАЛЬТОБЕТОН» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СООТНОШЕНИЯХ РАДИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ДИСК И ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ В ШИНЕ

д.ф.-м.н. ¹ Щербаков С.С., асп. ¹ Грибовский Г.В.

¹ Белорусский государственный университет, Минск

Введение. Сегодня для производителей автомобильных шин и автодорожных служб большое практическое значение имеют компьютерные модели, которые позволяют описать трёхмерное напряжённо-деформированное состояние (НДС) многоэлементной системы «диск–автомобильная шина–асфальтобетон» при оценке пространственной повреждаемости и износа как протектора шины, так и асфальтобетонного покрытия, работающих в условиях контактной, механической и фрикционной усталости. Много работ посвящено компьютерному или аналитическому моделированию НДС данной системы, однако большинство из них рассматривают отдельные элементы системы, не учитывая их взаимодействия во всей полноте [1–6]. Таким образом, проблема оценки одновременных контактных взаимодействий в многоэлементной системе «диск–автомобильная шина–асфальтобетон», ее трёхмерного НДС и состояния пространственной повреждаемости остаётся не полностью исследованной.

Основной задачей настоящей работы является определение объёмной повреждаемости в области контакта протектора шины и асфальтобетона на основании компьютерного конечно-элементного моделирования НДС [7] данной многоэлементной системы при различных комбинациях значений радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине.

Конечно-элементная модель системы и ее механические характеристики. Для моделирования была использована готовая геометрическая модель стального диска и грузовой шины с ромбовидным протектором радиусом 22,5 дюйма с учётом её основных конструктивных элементов [4,7] (рис. 1, табл. 1). Из модели были убраны зубья протектора, не входящие в контактное взаимодействие с асфальтобетоном, а также некоторые другие элементы, влияние которых на НДС в области контактного взаимодействия было незначительно. Асфальтобетонное покрытие было задано как прямоугольный параллелепипед размером 350x100x175 мм. Для сокращения времени расчетов и в силу симметрии модели была использована лишь ее четверть.

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 более плотная конечно-элементная сетка для получения гладких распределений компонент НДС и дальнейшего определения объёмной повреждаемости. (рис. 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–автомобильная шина–асфальтобетон», на грани субмоделируемой области (рис. 1в), и последующего решения дополнительной граничной задачи для данной области [8].

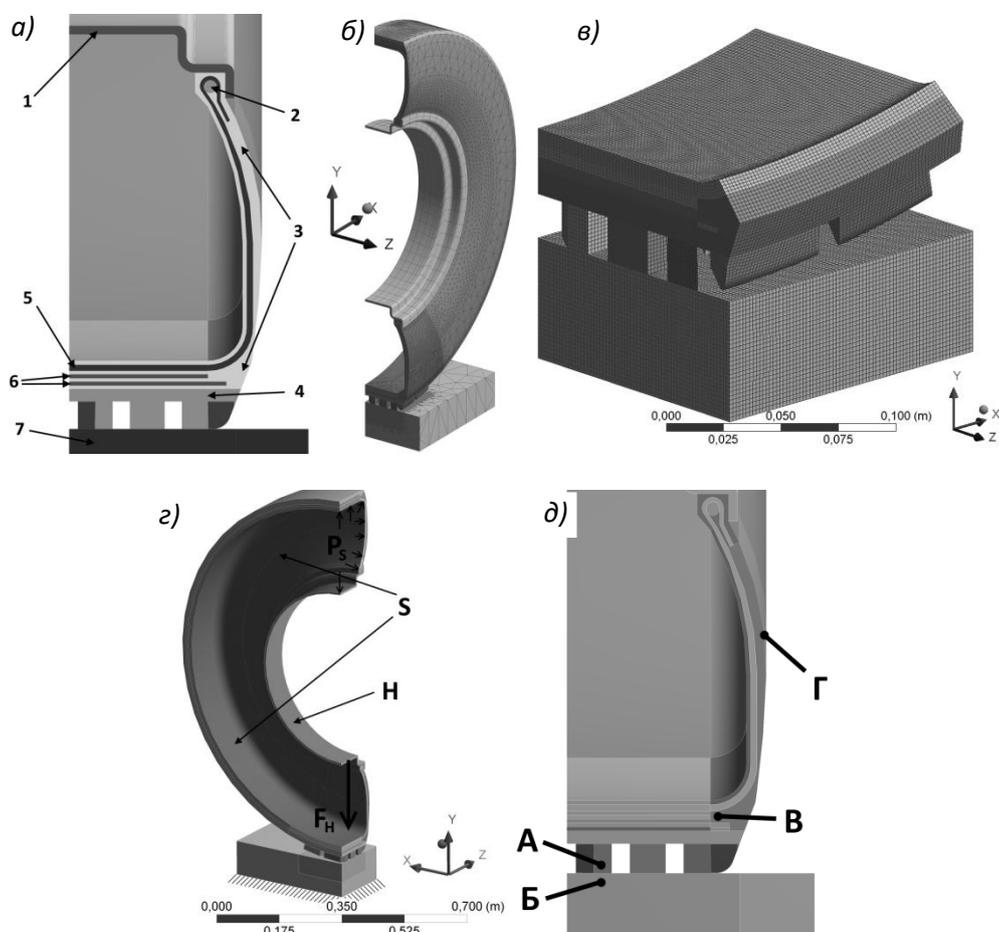


Рис. 1. Схематичное обозначение материалов (а), конечно-элементное разбиение всей модели (б) и в области субмоделирования (в), схема нагружения (г), рассматриваемые области для анализа повреждаемости (в): А – резиновый протектор, Б – асфальтобетон, В – резина пол нейлоновым каркасом, Г – резиновая бортовая часть шины

Граничные условия.

В системе были заданы следующие нагрузки и граничные условия [7,8]:

- внутреннее давление P_S (см. рис. 1в) в шине на поверхности S , которое изменялось от 6 до 10 кН с шагом в 1 кН;
- радиальная нагрузка F_H (см. рис. 1в и табл. 2) была направлена вдоль Oy , приложена к поверхности H и изменялась от 0,65 до 0,85 МПа с шагом в 0,5 МПа;
- основание асфальтобетонного покрытия было жестко зафиксировано во всех направлениях;
- 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 шина–асфальтобетон был равен 0,6).

В итоге было рассмотрено 25 различных вариаций нагрузок, для которых были рассчитаны трёхмерные распределения компонент НДС и объёмная повреждаемость в области контакта шины и асфальтобетона, а также бортовой части шины.

Анализ объёмной повреждаемости. 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 [9]:

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

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

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

В работе рассматриваются опасные объёмы в области контакта шины и асфальтобетона, которые работают в условиях фрикционной усталости. Предел допускаемых напряжений $\sigma_{int}^{(lim)}$ для условий фрикционной усталости в зоне контакта был принят равным 0,5 МПа, а для остальных резиновых частей системы – 1 МПа.

Формулы для расчета опасных объемов и их интегральной повреждаемости имеют следующий вид [6]:

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

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

В предыдущей работе [7] было рассмотрено НДС системы в четырёх её характерных точках, где образуются наибольшие напряжения (рис. 3в):

- А) в протекторе шины в области контакта;
- Б) в асфальтобетонном покрытии в зоне контакта;
- В) в резине под нейлоновым каркасом в области контакта;
- Г) в бортовой внешней части шины.

В данной работе дальнейший анализ повреждаемости системы «диск–автомобильная шина–асфальтобетон» также будет осуществляться по этим четырем характерным областям.

Протектор шины. Как видно из рисунка 2а, опасные объёмы образовывались непосредственно в областях наибольшего контактного давления при взаимодействии шины с асфальтобетоном. Шкала под рисунками описывает уровень локальной повреждаемости (1) в опасном объеме (3), т.е. во сколько раз действующие в конечном элементе напряжения превышают предельные, равные 0,5 МПа.

В протекторе шины, с изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН, опасные объёмы увеличиваются в 2,7–3 раза, а повреждаемость в 3,3–3,6 раза. Зависимость опасных объемов от радиальной нагрузки имеет характер близкий к линейному, несмотря на зубчатый вид протектора (рис. 3а). 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 опасных объемов и повреждаемости в резиновом протекторе. В основном, при увеличении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа опасные объёмы и повреждаемость увеличиваются на 1–3%, и только при радиальной нагрузке на диск $F_H = 6$ кН рассматриваемые характеристики увеличиваются на 10–12%.

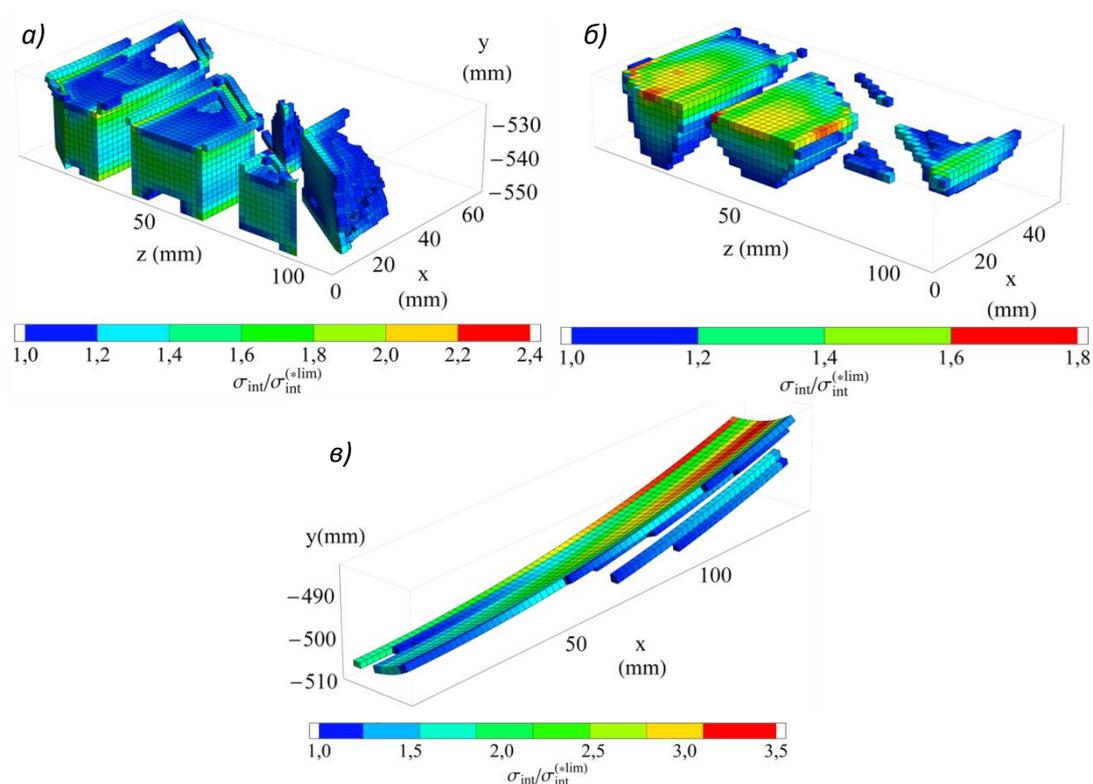


Рис. 2. Опасный объём по интенсивности напряжений V_{int} в протекторе шины (а), в асфальтобетоне (б) и в резине под нейлоновым каркасом (в) при $P_S = 0,85$ МПа и $F_H = 10$ кН

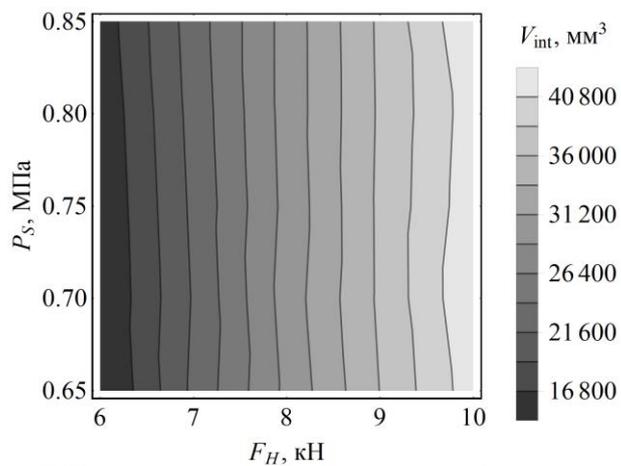
Асфальтобетон. Как и в протекторе шины опасные объёмы в асфальтобетоне концентрируются в области наибольшего контактного давления (рис. 2б).

С изменением радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН опасные объёмы и повреждаемость в асфальтобетоне увеличиваются нелинейно в 6–7,5 раз и в 6,6–8,2 раза соответственно (рис. 3б). Это 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 передаётся влияние радиальной нагрузки на диск.

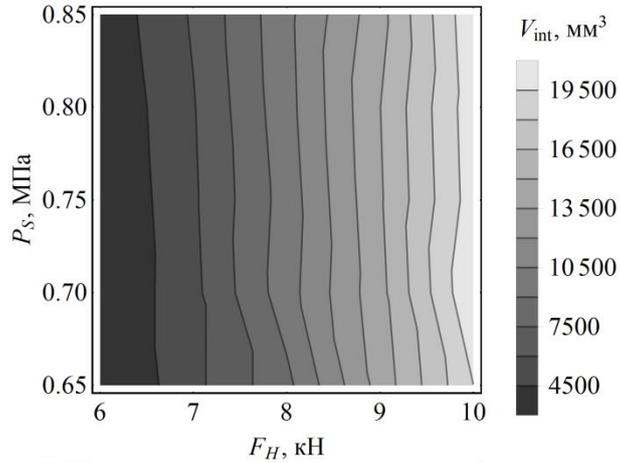
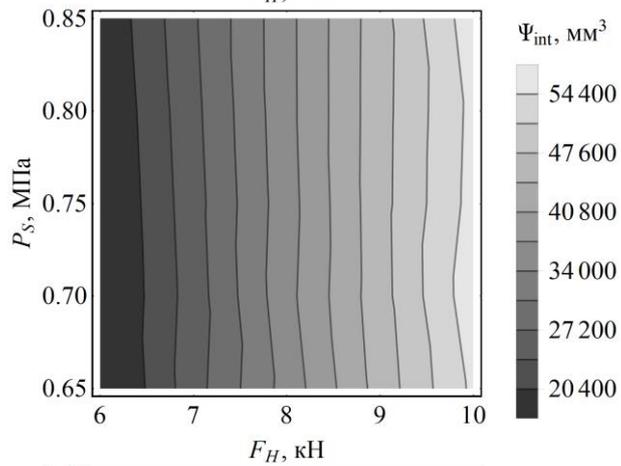
Опасные объёмы и повреждаемость в асфальтобетоне, при изменении внутреннего давления с 0,65 до 0,85 МПа изменяются на 3–30% в зависимости от значения радиальной нагрузки на диск. Наименьшие изменения наблюдаются при $F_H = 9$ кН, а максимальные при $F_H = 6$ кН.

Как видно из рисунков 3а и 3б, опасные объёмы и повреждаемость в резине протектора примерно в 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.

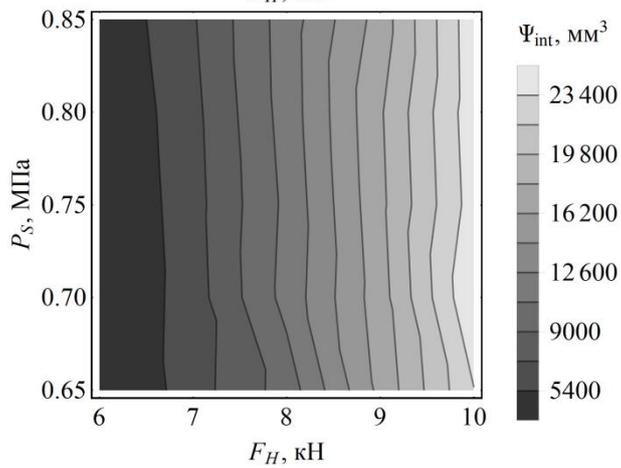
a)



б)



в)



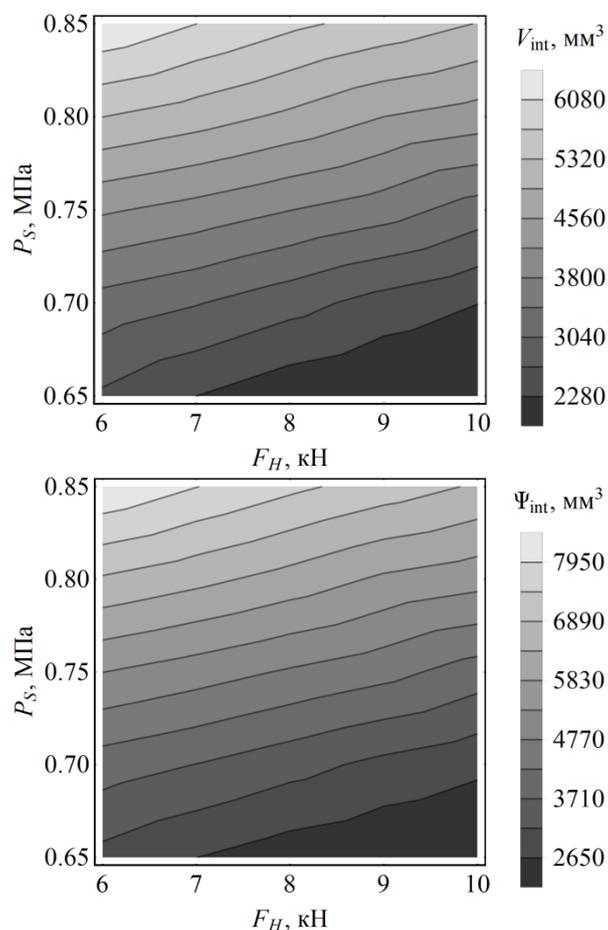


Рис. 3. Опасные объёмы V_{int} и повреждаемость Ψ_{int} для протектора шины (а), асфальтобетона (б) и резины под нейлоновым каркасом (в) при различных соотношениях радиальной нагрузки на диск F_H и внутреннего давления в шине P_S

Резина под нейлоновым каркасом в области контакта. Опасные объёмы в резине под нейлоновым каркасом возникают в зоне её взаимодействия с нейлоновым каркасом, а также внутри рассматриваемой области, за счёт того, что данная область шины испытывает наибольшие изгибающие нагрузки при деформировании шины (рис. 2в).

Опасные объёмы и повреждаемость в резине под нейлоновым каркасом с ростом радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН уменьшаются примерно на 17–34% несмотря на незначительное уменьшение напряжений в данной области (рис. 3в). 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 опасные объёмы и повреждаемость возрастают примерно в 2,4–3,1 и 2,7–3,4 раза соответственно в зависимости от значения радиальной нагрузки на диск.

Резина в бортовой части. По интенсивности напряжений опасные объёмы в резиновой бортовой части шины не образуются, т.е. при рассматриваемых внутренних давлениях в шине и радиальных нагрузках на диск в данной части шины образуются напряжения меньше 1 МПа.

Заключение. Проведено компьютерное моделирование трёхмерного напряжённо-деформированного состояния многокомпонентной системы «диск–автомобильная шина–асфальтобетон», нагруженной различными комбинациями внутреннего давления в шине и радиальной нагрузки на диск (табл. 2).

Получены распределения напряжений в системе с учетом контактного взаимодействия между шиной и асфальтобетоном. На основании полученных данных было проведено моделирование опасных объемов по интенсивности напряжений в шине и асфальтобетонном покрытии в зоне контакта, а также в резине под нейлоновым каркасом и в бортовой зоне. Полученные опасные объемы в асфальтобетоне оказались примерно 2-2,5 раза меньше, чем в резиновом протекторе, в силу большей жёсткости асфальтобетона. В резине бортовой части шины опасные объемы при различных рассмотренных нагрузках не образуются.

Практически во всех областях с увеличением нагрузок, опасные объемы и повреждаемость возрастают. Однако, при увеличении радиальной нагрузки на диск, опасные объемы для резины под нейлоновым каркасом уменьшаются, что может быть вызвано сложным характером перераспределения напряжений в данной области.

При изменении внутреннего давления в шине с 0,75 до 0,85 МПа опасные объемы и повреждаемость, в среднем, изменяются не более чем на 10%, за исключением резины под нейлоновым каркасом, где данные характеристики увеличиваются примерно в 2,4–3,1 раза и 2,7–3,4 раза соответственно, т.к. данная зона испытывает большие изгибающие нагрузки при радиальной нагрузке на диск в условии взаимодействия с нейлоновым каркасом и стальным брекером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларин А.А. Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой с учётом наличия эксплуатационной деградации материала / А.А. Ларин, Ю.В. Арефин // *Механика та Машинобудування*. – 2011. – №2 – С. 52.
2. 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.
3. 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. – С. 289–316.
4. Lopez, I. Tire/road friction modeling / I. Lopez, B. de Bruijn, A.J.C. Schmeitz – Eindhoven: TU/e, 2007. – С. 9.
5. Шейкина, В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины с жёстким покрытием / В.А. Шейкина – Иваново: ИГЭУ, 2012.
6. 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.
7. Щербаков С. С. Напряжённо-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.*
8. Грибовский, Г. В. Объёмная 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. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.