УДК 539.3

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДИСК–ШИНА–АСФАЛЬТОБЕТОН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СООТНОШЕНИЯХ РАДИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ДИСК И ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ В ШИНЕ

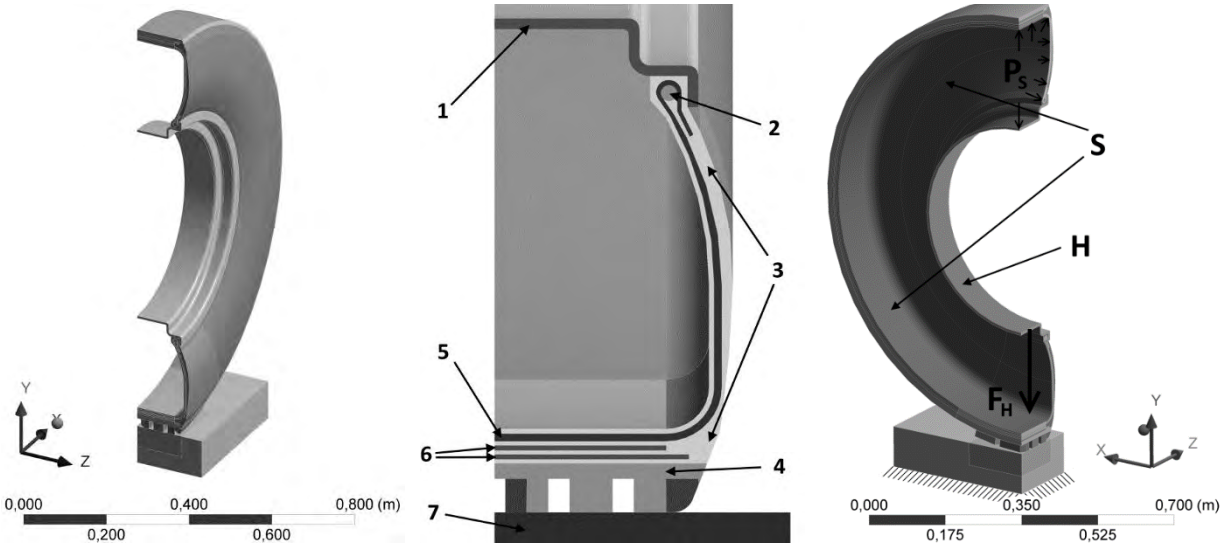
д.ф.-м.н. **Щербаков С.С.,** асп**. Грибовский Г.В.**

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. При проектировании элементов системы «автомобильная шина–асфальтобетон» и оптимизации параметров их взаимодействия, важную роль играют компьютерные модели трёхмерного напряженно-деформированного состояния (НДС). Для производителей автомобильных шин и автодорожных служб важной задачей также является оценка объёмной повреждаемости и износа протектора шины и асфальтобетонного покрытия, работающих в условиях контактной, механической и фрикционной усталости. Большое количество работ посвящено аналитическому и компьютерному моделированию НДС отдельных компонент вышеназванной системы [1,2,3]. Однако, задача оценки одновременных контактных взаимодействий элементов системы, их пространственного НДС и состояния объёмной повреждаемости остаётся не полностью исследованной.

Целью данной работы является определение с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования НДС многокомпонентной системы «диск–шина–асфальтобетон» при различных значениях радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине. Результаты, полученные в данной работе, в дальнейшем будут использованы для определения объёмной повреждаемости рассматриваемой системы.

Геометрическая модель системы и ее механические характеристики. В расчётах была использована готовая геометрическая модель стального диска и грузовой шины радиуса 22,5 дюйма, имеющей ромбовидный протектор (рис. 1а). Также в шине были учтены дополнительные конструктивные элементы [4], приведённые на рисунке 1б и перечисленные в табл. 1 [5].



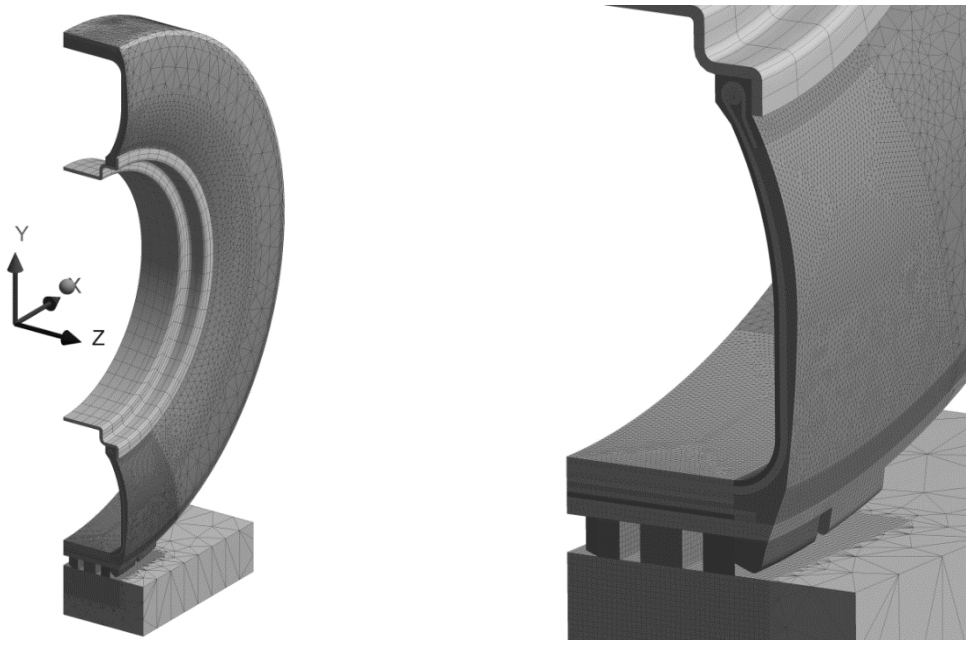
а *б* *в*

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

Таблица 1 – Механические характеристики элементов системы

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

Конечно-элементное разбиение и граничные условия. В работе особое внимание уделялось трехмерному напряженно-деформированному состоянию в зоне контакта протектора шины и асфальтобетона. В указанной области в направлении действия радиальной нагрузки была задана более плотная расчетная сетка (см. рисунок 2а, 2б).



а *б*

Рис. 2. Конечно-элементное разбиение модели: полная модель (а), окрестность контактного взаимодействия (б)

Граничные условия для системы были заданы следующие [5]:

- внутреннее давление p_S (см. рис. 1в и табл. 2) в шине на поверхности *S;*
- радиальная нагрузка F_H (см. рис. 1в и табл. 2) направленная вдоль *Oy*, приложенная к поверхности Н;
- 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 [6]);

- на поверхностях сечений модели в плоскостях *xOy* и *yOz* были заданы условия симметрии по оси *z* и *x* соответственно.

Таблица 2 – Комбинации внутреннего давления в шине и радиальной нагрузки на диск, при которых проводились расчёты

F_H, кН / p_S, МПа	6	7	8	9	10
0,75	+	-	+	-	+
0,80	+	-	+	-	+
0,85	+	+	+	+	+

Анализ напряжённо-деформированного состояния. Расчёт НДС проводился в программном комплексе ANSYS Workbench. Вне зависимости от рассматриваемых нагрузок, в системе диск–шина–асфальтобетон максимальная интенсивность напряжений (рис. 3а, 3б) возникает в диске в направлении радиальной нагрузки, а также в окрестности концентраторов напряжений. Также большие напряжения возникают в бортовом кольце шины, нейлоновом каркасе и в стальных слоях брекера. В асфальтобетоне, как и в резине, напряжения на порядок меньше, по сравнению с остальными элементами системы. Соответственно, в резине деформации на порядок больше. Более детальный анализом НДС каждого элемента системы при заданных нагрузках, приведен в работе [5].

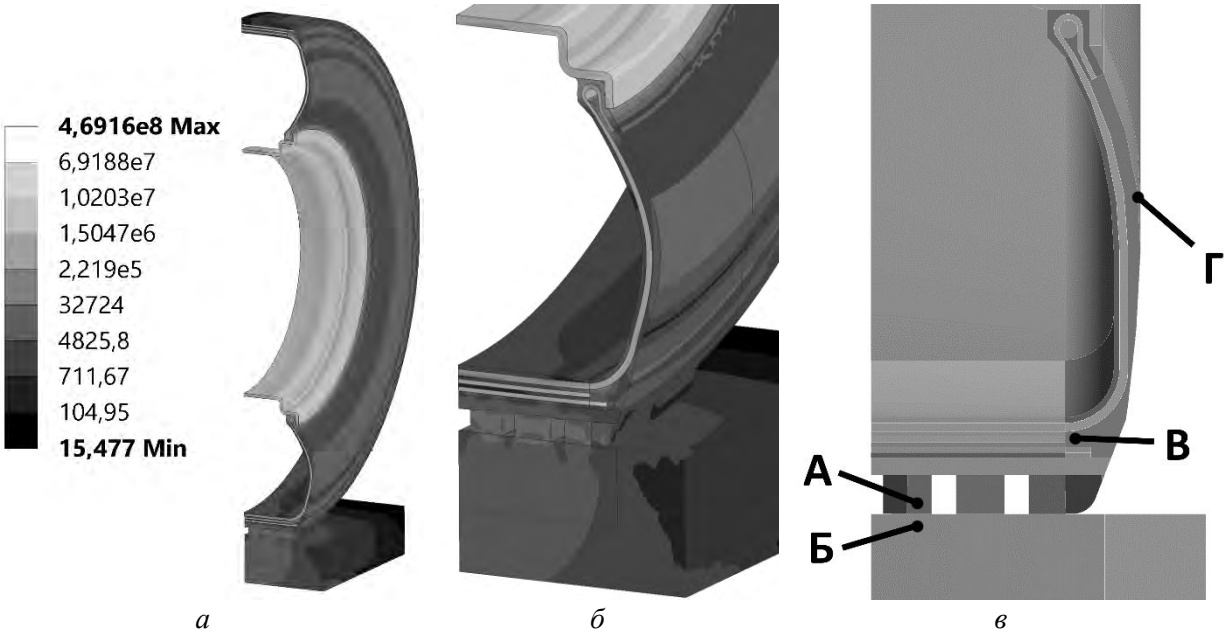


Рис. 3. Интенсивность напряжений во всей системе (а, б), рассматриваемые точки для анализа НДС системы (в): А – резиновый протектор, Б – асфальтобетон, В – резина пол нейлоновым каркасом, Г – резиновая бортовая часть шины

Поскольку рассматриваемая система содержит много элементов, то её комплексный анализ затруднителен. Дальнейший анализ будет осуществляться по четырем характерным точкам, 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.

Протектор шины. Интенсивность напряжений и деформаций в выбранной точке А резинового протектора в области контакта шины и асфальтобетона имеет зависимость от F_H близкую к линейной (рис. 4). С увеличением радиальной нагрузки F_H с 6 до 10 кН, напряжения и деформации увеличиваются примерно на 34%. Напряжения увеличиваются с 0,65 до 0,90 МПа, а деформации с 170 до 230 мм/мм.

При изменении внутреннего давления в шине p_S с 0,75 до 0,85 МПа интенсивность напряжений в рассматриваемой точке А, увеличивается незначительно.

Асфальтобетон. Интенсивность напряжений и деформаций в выбранной точке Б асфальтобетона в области контакта с резиновым протектором шины имеет, как и в шине, близкую к линейной зависимость от F_H (рис. 4). С увеличением нагрузки с 6 до 10 кН, напряжения увеличиваются примерно на 37% с 0,57 до 0,78 МПа, а деформации на 25% с 0,40 до 0,55 мм/мм. Деформации в резиновом протекторе шины на порядки выше, чем в асфальтобетоне, который является гораздо более жёстким материалом.

Интенсивности напряжений увеличивается незначительно при изменении внутреннего давления p_S с 0,75 до 0,85 МПа в зафиксированной точке в асфальтобетонном покрытии. Гораздо большее влияние на напряжения в области контакта оказывает радиальная нагрузка на диск.

Резина под нейлоновым каркасом в области контакта. Интенсивность напряжений в резине в выбранной точке В под нейлоновым каркасом в области контакта шины и асфальтобетона имеет зависимость от F_H близкую к линейной (рис 4). Несмотря на увеличение радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН, напряжения уменьшаются на 3% с 1,76 до 1,71 МПа, а деформации на 6 % с 220 до 214 мм/мм. Это может быть связано со сложным характером перераспределения напряжений в данной области шины при взаимодействии с другими её элементам, такими как нейлоновый каркас и стальной брекер.

Более значительное влияние на данную область имеет изменение внутреннего давления в шине p_S с 0,75 до 0,85 МПа, при котором напряжения линейно возрастают примерно на 13%.

Резина в бортовой части. Интенсивность напряжений и деформаций в выбранной точке Г бортовой части шины с увеличением нагрузки с 6 до 10 кН возрастает незначительно (рис. 4), и её изменение носит линейный характер.

Внутреннее давление в рассматриваемой точке оказывает большее влияние на изменение напряжений, увеличивая их примерно на 12%.

Заключение. Проведено компьютерное моделирование трехмерного напряжённо-деформированного состояния многокомпонентной системы диск–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. 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.

Были проанализированы изменения интенсивности напряжений и деформаций в 4-х характерных точках системы (рис. 3в) в зависимости от нагрузок на диск и внутреннего давления в шине (табл. 2).

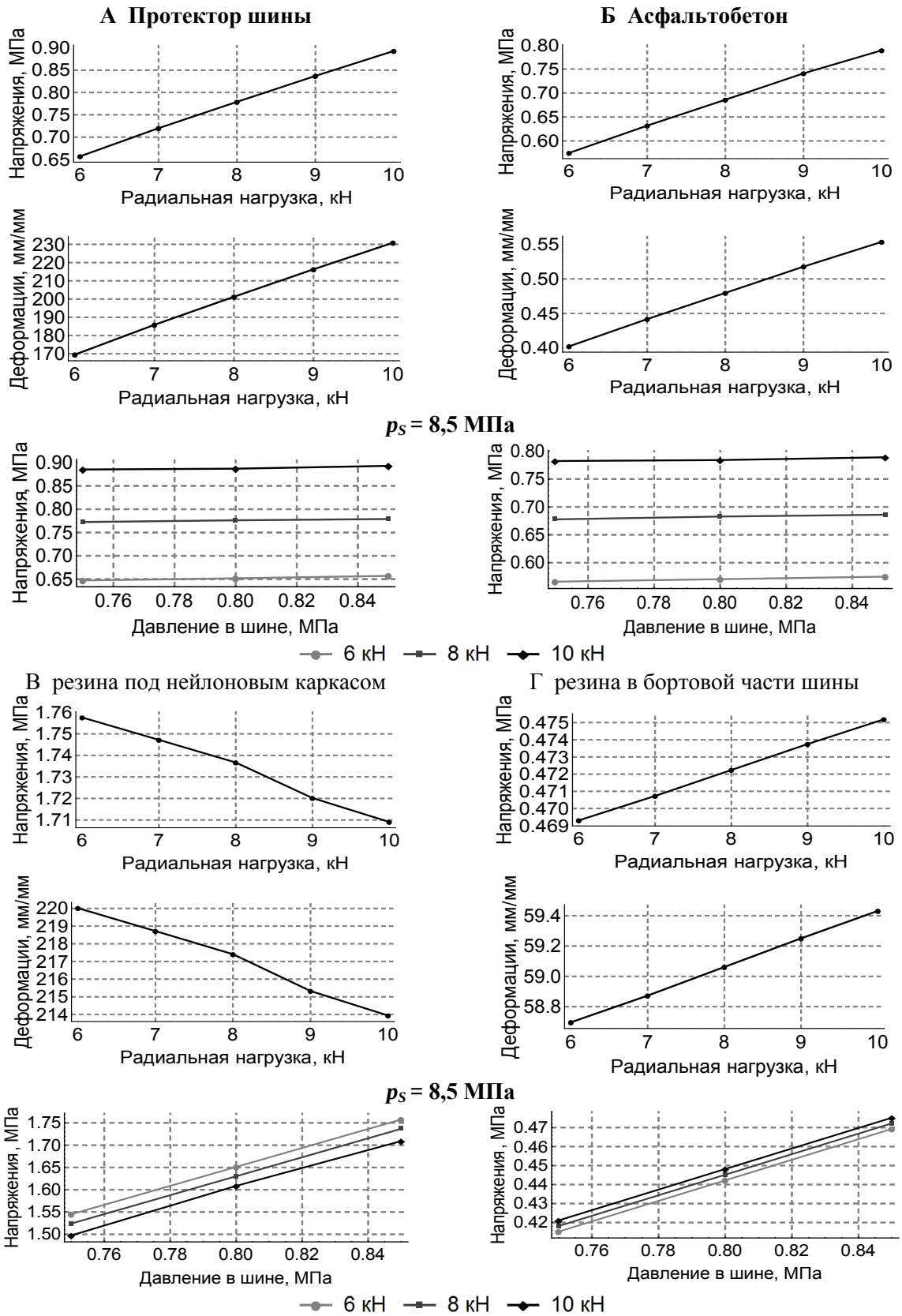


Рис. 4. Графики изменения интенсивности напряжений и деформаций в зависимости от радиальной нагрузки на диск и внутреннего давления в шине в рассматриваемых точках А, Б, В и Г (рис. 3в)

При увеличении радиальной нагрузки на диск с 6 до 10 кН напряжения и деформации в резиновом протекторе, асфальтобетоне и бортовой части шины возрастают в разной степени. Наибольший прирост напряжений и деформаций наблюдается в резиновом протекторе на 34%, а наименьший на 1% – в бортовой части шины. В резине под нейлоновым каркасом напряжения и деформации уменьшаются на 3% и 6% соответственно. Все зависимости напряжений и деформаций от радиальной нагрузки на диск имеют форму близкую к линейной.

При увеличении внутреннего давления в шине с 0,75 до 0,85 МПа напряжения в резиновом протекторе и асфальтобетоне увеличиваются незначительно. Изменение внутреннего давления в шине имеет большее влияние на резину под нейлоновым каркасом и в бортовой части шины, увеличивая там напряжения на 12-13%.

ЛИТЕРАТУРА

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. – С. 289–316.*
2. *Шейкина, В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины с жёстким 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. *Lopez, I. Tire/road friction modeling /I. Lopez, B. de Bruijn, A.J.C. Schmeitz – Eindhoven: TU/e, 2007. – С. 9.*
5. *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.*
6. *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.*