

УДК: 504.055

OECD: 01.03.AA ACOUSTICS

Исследование и снижение шума подвижного состава метрополитена в КНР

Сяо Шусинь¹, Туркина Н.Р.^{2*}, Буторина М.В.³¹Аспирант кафедры «Механика деформируемого твердого тела»²К.т.н., доцент, доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела»³Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика»^{1,2,3}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В работе рассматривались источники шума на станциях метрополитена в Китае. Представлены результаты измерения виброакустического воздействия в помещениях распространенной в КНР односводчатой станции метрополитена. Далее был определен основной по интенсивности источник звука в метрополитене – система колесо-рельс. С помощью программного комплекса SolidWorks на основе метода конечных элементов проведено моделирование колеса вагона метрополитена. Особое внимание в работе уделялось моделированию конструкций колеса и расчету собственных частот и форм колебаний. Научная новизна работы заключается в определении максимального массового участия конструкции колеса на третьей собственной частоте. Результаты расчета показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Авторами был предложен вариант бюджетного изменения конструкции для снижения шума установкой вибродемпфирующих накладок без снижения прочности конструкции колеса. Проведен расчет запаса прочности, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: метро, источники шума, система колесо-рельс, собственные частоты, формы колебаний, снижение шума, запас прочности

Research and reduction of noise from subway rolling stock in China

Xiao Shuxin¹, Turkina N.R.^{2*}, Butorina M.V.³¹Postgraduate student in the Department of Mechanics of Deformable Solids²Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanics
of Deformable Solids³D.Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and
Computational Mechanics^{1,2,3}Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

This paper examined noise sources in Chinese subway stations. Measurements of vibroacoustic impacts in the interiors of single-vault subway stations, a common feature in China, are presented. The primary source of sound intensity in subway stations – the wheel-rail system was then identified. Using the SolidWorks software package and the finite element method, a subway car wheel was simulated. Particular attention was paid to

*E-mail: turkina_nr@voenmeh.ru (Туркина Н.Р.)

modeling the wheel's structure and calculating its natural frequencies and vibration modes. The scientific novelty of this work lies in determining the maximum mass contribution of the wheel at the third natural frequency. The calculation results showed good agreement with experimental data. The authors proposed a cost-effective design modification to reduce noise by installing vibration damping pads without compromising the wheel's structural strength. They calculated the safety margin and provided practical recommendations.

Keywords: *metro, noise sources, wheel-rail system, natural frequencies, vibration modes, noise reduction, safety margin*

Введение

В современном обществе одно из важных мест занимают пассажирские перевозки. Их роль важна как в социальной, так и в экономической сферах. Практически ежедневно каждый житель мегаполиса пользуется услугами городского пассажирского транспорта, без развития которого трудно представить жизнедеятельность современного мегаполиса [1]. Темпы развития городской застройки, увеличение населения, вынос крупных промышленных предприятий за пределы городов обуславливают необходимость развития транспортной инфраструктуры, создание новых маршрутов, использование все большего количества транспортных средств. Первостепенными задачами обеспечения пассажирских перевозок местного, локального значения являются скорость перевозок и обеспечение безопасности пассажиров.

В условиях стремительного роста парка личного автотранспорта одну из ключевых ролей в обеспечении вышеуказанных задач выполняет городской рельсовый транспорт и, в частности, метрополитен, который является на сегодняшний день одним из самых быстрых и популярных видов городского транспорта. Скорость строительства метро в КНР очень высокая, в среднем за последние годы строилось более 1000 км линий в год, что значительно опережает другие страны. Это обусловлено масштабным инвестированием в транспортную инфраструктуру, а также применением современных технологий.

1 Источник и анализ проблемы

Шум на сегодняшний день является одним из самых неблагоприятных физических факторов, воздействующих на здоровье человека. Это обусловлено массовостью воздействия повышенных уровней шума. По различным экспертным оценкам, в больших мегаполисах повышенным уровнем шума подвергается от трети до половины населения. Шум рельсового транспорта находится по массовости воздействия на третьем месте после авиационного и автомобильного транспорта. При этом, конечно, воздействие на население шума открытых линий метрополитена в процентном отношении не столь велико, однако в абсолютных величинах от шума открытых линий метрополитена страдают несколько сотен тысяч человек. Учитывая, что строительство открытых линий метро становится все более популярным, проблема повышенного шума, генерируемого метростанциями, начинает приобретать все более актуальный характер.

1.1 Основные источники шума в метрополитене

Обычно метрополитен представляет собой систему пассажирских и служебных помещений, позволяющих осуществлять транспортировку пассажиров и работу систем в условиях большого пассажиропотока. Основными пассажирскими помещениями типовых станций метрополитена являются: вестибюль станции, расположенный

в надземной части станции, эскалаторный тоннель (для станций глубокого заложения), платформенный зал (подземная часть станции) и в некоторых случаях пересадочный коридор между станциями.

Приведем пример источников шума на наиболее распространенной в КНР станции метрополитена – одноводчатой (уровень заложения в расчет не принимался). Эскалаторный тоннель содержит по 3 эскалатора с каждой стороны. Станция имеет 2 пути следования поездов.

Были рассмотрены уровни шума и вибрации в следующих помещениях станции метрополитена – двух эскалаторных тоннелей и платформенного зала станции.

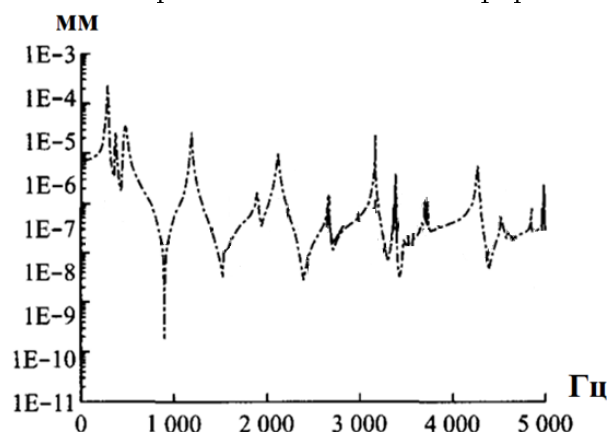


Рисунок 1 – Результаты измерения вибрационного смещения на платформе станции метрополитена

Также были проведены измерения уровней шума на рабочих местах дежурного персонала станции [1]-[2]. Согласно результатам измерений уровней шума, в платформенном зале станции превышение предельно допустимых уровней составляет 25-26 дБА для эквивалентного уровня звука и 20-23 дБА для максимального уровня звука. Основной вклад в процессы шумообразования вносит шум от движения подвижных составов. Анализ составляющих, входящих в общее излучение от подвижного состава, показал, что имеются три важных отдельных источника излучения, формирующий звуковое поле:

- шум движущегося состава, возникающий в системе «колесо-рельс»;
- шум работы электродвигателя и другого оборудования поезда при отправлении со станции.

Было установлено, что при прибытии на станцию электродвигатель подвижного состава не задействован, либо имеет минимальную нагрузку. Излучаемый при этом шум определяется как шум взаимодействия «колесо-рельс» (при расчете суммарной звуковой нагрузки при въезде состава на станцию в шуме от системы «колесо-рельс» шум двигателей не учитывался). Самым интенсивным шум электродвигателя является во время отправления поезда со станции. Полученные характеристики источников шума в платформенном зале представлены в таблице 1.

В расчете уровней шума в платформенном зале не была учтена работа вентиляции и эскалаторов, т. к. данные источники не вносят ощутимого вклада в шумовую картину помещения. Для пассажирских помещений обычно используют комплексы шумозащитных мероприятий, позволяющие снизить уровни шума, как в источнике образования, так и на пути распространения шума. При этом данные мероприятия не требуют кардинального технологического переоборудования станций (замены подвижных составов метрополитена) и позволяют добиться достижения допустимых уровней шума на рабочих местах.

Таблица 1 – Характеристики источников шума в платформенном зале

Источник шума	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Система «колесо-рельс»	78	75	74	83	83	79	73	67	60
Шум электродвигателя	76	69	74	81	83	80	74	67	60

2 Снижение шума в системе «колесо-рельс»

В качестве шумозащитного мероприятия для снижения уровней шума в помещении платформенного зала авторами рекомендовано оборудование бесстыкового пути, как мероприятие, направленное на снижение шума в самом источнике образования (система «колесо-рельс») [3]-[4].

Для снижения уровней шума в платформенном зале станций метрополитена рекомендуется введение дополнительной эквивалентной площади звукопоглощения на стены и потолок в виде звукопоглощающего материала. По результатам представленных в работах [5]-[6] расчетов, эффективность данного шумозащитного мероприятия составляет 2-8 дБА в зоне отраженного шума. Основным мероприятием, направленным на снижение шума на пути его распространения, является установка сплошного барьера (звукоизолирующей перегородки, стенки), отделяющего источник шума от пассажиров, как это сделано на станциях метрополитена Китая и России (рисунок 2). Такие мероприятия позволяют значительно снизить уровни шума на пассажирском перроне.

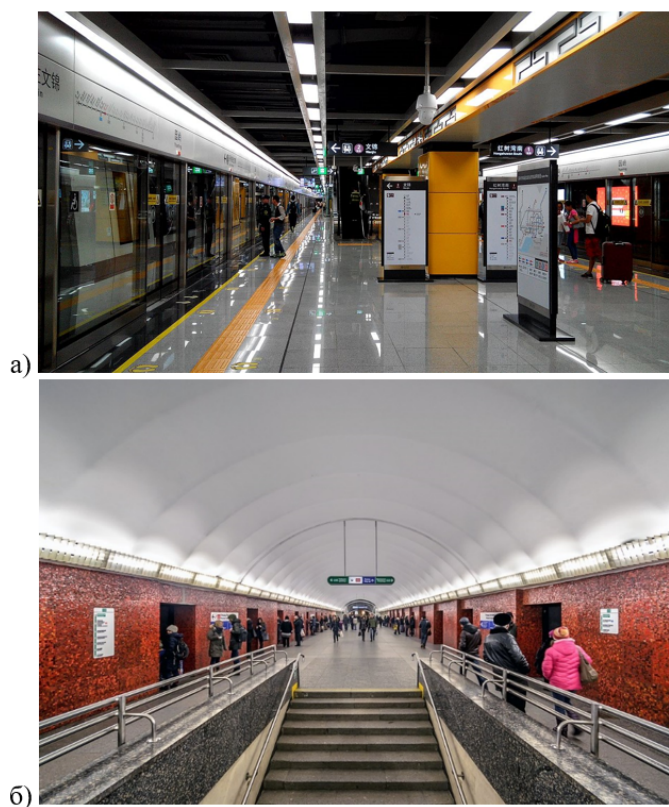


Рисунок 2 – Звукоизолирующие перегородки на станциях метро: а) КНР – станция метро в г. Шеньжень [7], б) РФ – станция метро в г. Санкт-Петербург [8]

Как видно из предыдущего анализа ситуации, основные мероприятия по снижению шума рассчитаны на статичное расположение элементов шумозащиты. Основным источником шума является система «колесо-рельс», рассматриваемая в данной работе.

3 Методы и порядок проведения акустических расчетов в конечно-элементном комплексе SolidWorks

С точки зрения оценки напряженного состояния в любой точке тела, по теории упругости и механике сплошной среды [9]-[10] описывается следующий подход: действующие в теле напряжения раскладываются по граням элементарного параллелепипеда и, в соответствии с общим видом закона Гука (рисунок 3), образуется тензор напряжений, который является совокупностью всех напряжений (три нормальных и шесть касательных), действующих на трех взаимно перпендикулярных гранях.

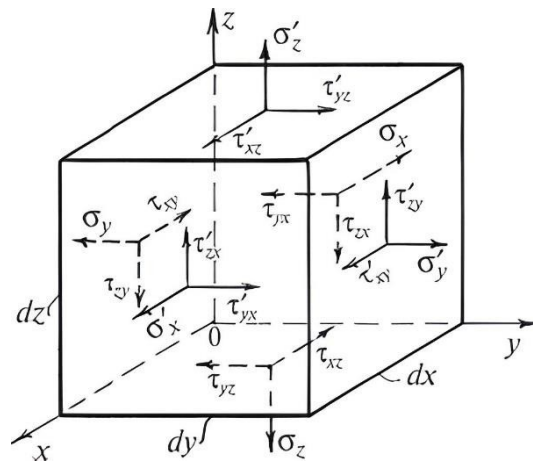


Рисунок 3 – Графическое изображение тензора напряжений

Тензор напряжений однозначно характеризует напряженное состояние в точке тела и математически выглядит как (1):

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для решения задач механики в каждой точке нам необходимо знать 15 параметров напряженно-деформированного состояния. Для нахождения этих функций в программных комплексах по методу конечных элементов пользуются пятнадцатью уравнениями:

- три уравнения равновесия Навье-Стокса;
- шесть уравнений Коши;
- шесть уравнений Гука.

Из этого следует, что математически задача может быть решена путем интегрирования уравнений при выполнении условий на поверхности и соблюдения уравнений неразрывности деформации. При выполнении граничных условий решение является единственным.

4 Моделирование колеса. Расчет собственных частот и форм колебаний

Далее в работе был рассмотрен второй источник шума системы «колесо-рельс», а именно колесо. Колесо колесной пары вагонов метро имеет унифицированную

геометрию (рисунок 4). Проведено моделирование колеса и расчет собственных частот и форм колебаний с помощью пакета прикладных программ SolidWorks.

Частоты и форма собственных колебаний получаются из решения обобщенной формулы для собственных колебаний (2):

$$AM\vec{V} = \lambda\vec{V}, \quad (2)$$

где A – матрица податливости:

$$A = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nn} \end{pmatrix},$$

$$\delta_{21} = \delta_{12}, \delta_{23} = \delta_{32}, \dots,$$

где V – матрица векторов форм собственных колебаний; M – матрица масс:

$$A = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{pmatrix},$$

где λ собственные значения:

$$\lambda = \frac{1}{\omega^2},$$

где ω – круговая частота, рад/с.

Каждая масса представляет собой три линейных динамические степени свободы. Модель колеса и его разбивка на конечные элементы приведена на рисунке 4.

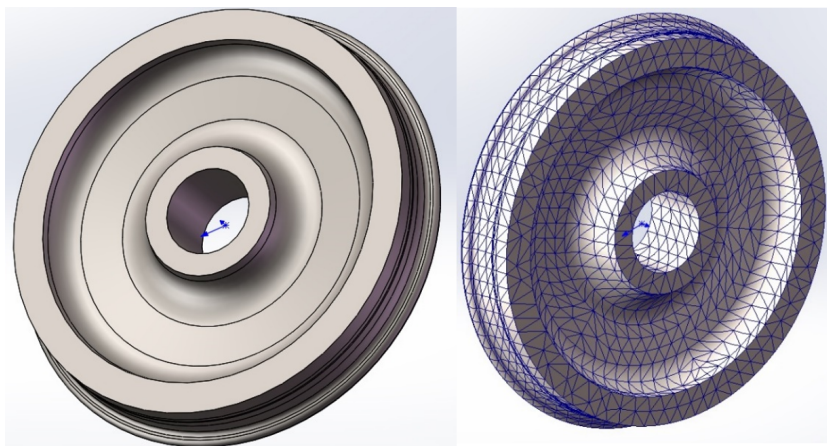


Рисунок 4 – Модель колеса и разбивка его на конечные элементы

Далее были проведены расчеты первых 25-ти собственных частот и форм колебаний модели колеса вагонов метро, так же было рассмотрено массовое участие конструкции колеса в колебаниях по осям X , Y и Z . Результаты расчетов первых 10-ти собственных частот приведены в таблице 2. Результаты расчетов собственных частот с 11 по 25 не приведены, так как суммарное массовое участие в них составляет менее 1 %.

Расчеты показывают, что основной источник шума колеса приходится на третью собственную частоту 209,9 Гц и составляет 0,75976 массы всего колеса по оси X и седьмую собственную частоту 1149 Гц и составляет 0,58043 массы по оси Y . Полученные результаты совпадают с результатами измерения вибрации на платформе станции метрополитена, представленными на рисунке 1.

Таблица 2 – Результаты расчетов первых десяти собственных частот модели колеса вагонов метро

№ собственной частоты	Частота, Гц	Массовое участие		
		Направление X	Направление Y	Направление Z
1	128,57	1,16E-07	0,0011908	0,00053017
2	128,65	5,73E-07	0,00052912	0,0011903
3	209,90	0,75976	5,79E-10	2,64E-11
4	443,61	9,85E-10	1,98E-10	2,30E-10
5	443,80	7,04E-09	4,09E-09	1,36E-10
6	516,24	1,15E-09	1,17E-10	2,35E-10
7	1 149,00	7,09E-14	0,58043	0,18204
8	1 149,00	4,51E-10	0,18202	0,58045
9	1 193,7	1,82E-11	1,42E-06	9,34E-10
10	1 194,1	4,18E-09	1,21E-08	5,89E-07

Для наглядности приведем формы колебаний 1, 2, 3, 4 и 7 на рисунках 5-7.

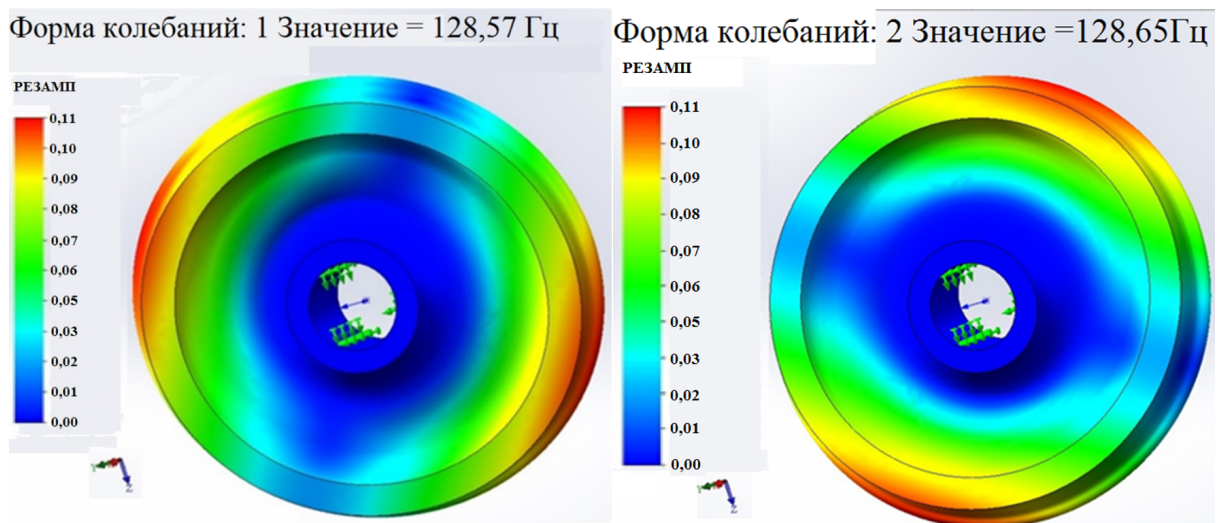


Рисунок 5 – Первая и вторая формы колебаний

Как видно из рисунка 6, диск колеса при свободных колебаниях работает как гонг, что подтверждается расчетами таблицы 2 и результатами натурных измерений (рисунок 1).

Современные тенденции шумозащиты направлены в основном на снижение шума на пути распространения. Однако снижение шума в источнике более рационально. Предлагается сделать в колесе 2 или 4 отверстия диаметром 50 мм для крепления вибродемпфирующих накладок. Далее были проведены расчеты запаса прочности сплошного колеса и колеса с 4 отверстиями (рисунок 8). Из расчетов было установлено, что запас прочности у сплошного колеса составляет 2,0. Расчетный запас прочности колеса с 4-мя отверстиями составляет 1,9. Запас прочности уменьшился, но все равно выше регламентированного ГОСТ 4835 - 2013 (Российский аналог) значения 1,7. Следовательно, наличие отверстий несущественно снижает запас прочности колеса.

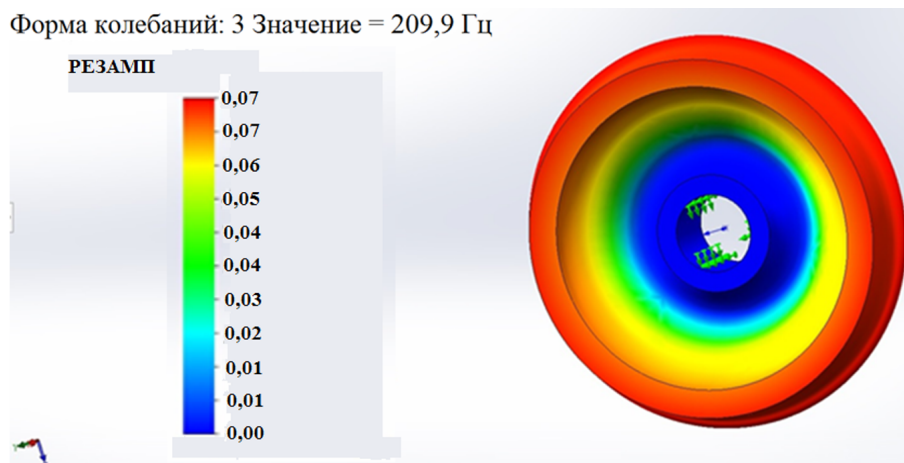


Рисунок 6 – Третья форма колебаний

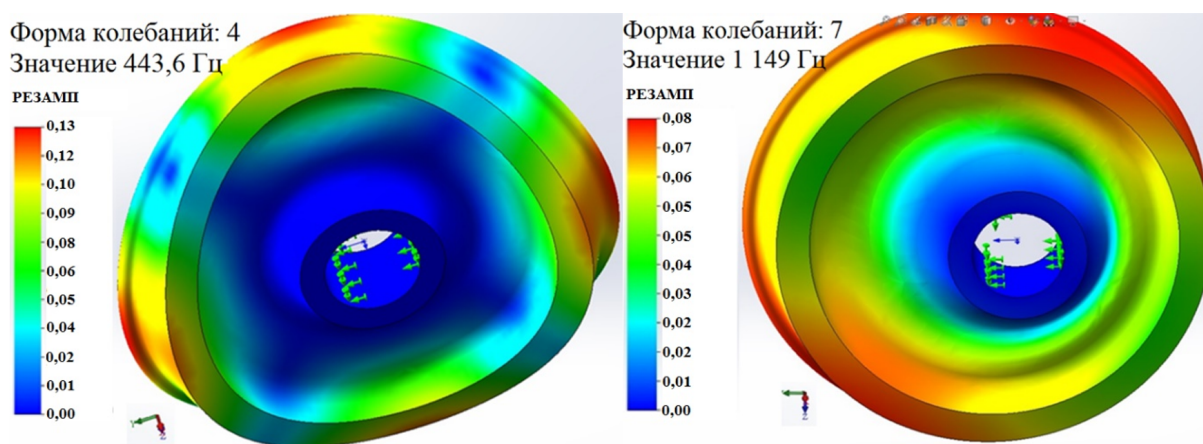


Рисунок 7 – Четвертая и седьмая формы колебаний

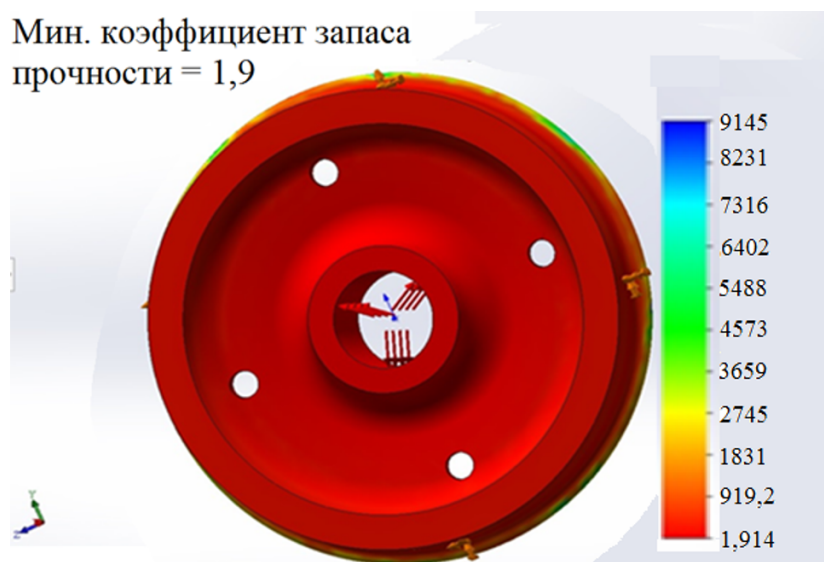


Рисунок 8 – Результаты расчета запаса прочности колеса с 4 отверстиями

Расчеты собственных частот модели колеса вагонов метро дают широкие возможности моделирования вибродемпфирующих накладок и расчетов снижения шума и вибрации после установки. Прогнозные расчеты, проведенные в модуле программы SolidWorks FlowSimulation, показывают, что снижение может достигать 10-15 дБ.

Заключение

В данной работе был проведен анализ источников шума на станции метрополитена в КНР. Исследования показали, что основным источником шума является система колесо-рельс. Было проведено моделирование конструкции колеса и с помощью метода конечных элементов в программе SolidWorks, рассчитаны собственные частоты и формы колебаний. В результате проведенных расчетов было определено массовое участие конструкции колеса и установлены максимальные значения на третьей собственной частоте. Для улучшения акустических характеристик авторами предложен вариант конструктивной оптимизации модели колеса – установка вибродемпфирующих накладок на четыре монтажных отверстия. Предложенная конструкция колеса вагона позволит после установки наиболее целесообразным образом обеспечить снижение шума и вибрации, сохраняя при этом необходимые стабильность геометрических параметров и прочность конструкции.

Список использованных источников

1. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией: учебник. Т. 2 / М. В. Буторина, Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2024. - 381 с.
2. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Защита от шума и вибрации: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284 с.
3. Чжу Чэн. Исследование характеристик пневматических источников шума высокоскоростных железнодорожных транспортных средств [D]. Даляньский университет Цзяотон, 2018. – 123 с.
4. Андриященко А. К. Оценка и снижение шума на станции метрополитена открытого типа // NOISE Theory and Practice. - 2017. - Т. 3, № 2. - С. 25–37.
5. Туркина, Н. Р. Моделирование шумоизоляционных экранов транспортных магистралей / Н. Р. Туркина, Г. Минсюй, С. Шибо // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 16–17 марта 2025 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 302-306.
6. Проблемы современной инженерной акустики. Шашурин А.Е., Борцова С.С., Васильева В.К. В сборнике: Защита от повышенного шума и вибрации. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2021. - С. 11-15.
7. "9号线西延线计划12月8日开通, 前海至罗湖文锦只需约44分钟". 深圳新闻网 深圳商报. 2019-11-22. Retrieved 2019-11-22.
8. Маяковская - Питерское метро URL: <https://subway-spb.ru/ru/line3/mayakovskaya> (дата обращения: 03.12.2025).
9. Кознов, Г. Ю. Оценка действия динамических нагрузок на противотаранное устройство / Г. Ю. Кознов, Н. Р. Туркина, А. З. Красильников // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 03–06 апреля 2023 года. Том 2. – СПб: Типография Любавич, 2023. – С. 184-188.
10. Павлов, А. С. Метод конечных элементов в статике стержневых конструкций: курс лекций / А.С. Павлов. Балтийский государственный технический университет – СПб., 2013. – 72 с.

References

1. Fundamentals of vibroacoustics. Theory and practice of noise and vibration control: textbook. Vol. 2 / M. V. Butorina, N. I. Ivanov, A. E. Shashurin: BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov. - Saint Petersburg: Publishing house of BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, 2024. - 381 p.
2. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Protection from noise and vibration: a textbook. - 2nd ed., revised and additional - St. Petersburg: Printing Shop, 2019. - 284 p.
3. Zhu Cheng. Investigation of the characteristics of pneumatic noise sources of high-speed railway vehicles [D]. Dalian Jiaotong University, 2018 – 123 p.
4. Andryushchenko A. K. Noise assessment and reduction at an open-type metro station // NOISE Theory and Practice. 2017. Vol. 3, No. 2. pp. 25-37.
5. Turkina, N. R. Modeling of noise insulation screens of transport highways / N. R. Turkina, G. Mingxiu, S. Shibo // Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: Collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference of Young scientists and students with international participation, Penza, March 16-17, 2025. Penza: Penza State Agrarian University, 2025, pp. 302-306.
6. Problems of modern engineering acoustics. Shashurin A.E., Bortsova S.S., Vasilyeva V.K. In the collection: Protection against increased noise and vibration. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Edited by N.I. Ivanov. Saint Petersburg, 2021. pp. 11-15.
7. "The western extension of Metro Line 9 is scheduled to open on December 8th, reducing the travel time between Qianhai and Wenjin in Luohu to approximately 44 minutes." Shenzhen News Network, Shenzhen Business Daily. 2019-11-22. Retrieved 2019-11-22.
8. Mayakovskaya – Piter Metro. URL: <https://subway-spb.ru/ru/line3/mayakovskaya> (retrieved: 03.12.2025).
9. Koznov, G. Yu. Assessment of the effect of dynamic loads on an anti-ram device / G. Yu. Koznov, N. R. Turkina, A. Z. Krasilnikov // Actual problems of protection and safety: Proceedings of the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 03-06 April 2023. Volume 2. Saint Petersburg: Lyubavich Printing House, 2023. pp. 184-188.
10. Pavlov, A. S. Finite element method in the statics of rod structures: a course of lectures / A.S. Pavlov. Baltic State Technical University– St. Petersburg, 2013– 72 p.