

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-284-292

УДК 001.891.57

Модели и методика моделирования деформаций в САПР ANSYS для систем железнодорожных вагонных весов

Марк Анатольевич Денисенко¹, Алина Сергеевна Исаева²,
Александр Сергеевич Синюкин³✉, Андрей Владимирович Ковалев⁴

^{1,2,3,4} Южный федеральный университет, Таганрог, 344006, Российская Федерация

¹ dema.bmfe@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5044-7482>

² isaevaas@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5145-0963>

³ sinyukin@sfedu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0496-0087>

⁴ avkovalev@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0545-7416>

Аннотация

Введение. Возможность быстрого, удобного и точного определения массы груза в вагонах позволяет повысить безопасность транспорта, а также обеспечить учет активов в железнодорожной инфраструктуре. Известны трехмерные твердотельные модели участка железнодорожного пути и методики моделирования деформаций, возникающих в рельсах под действием механических нагрузок, передаваемых через вагонные колеса. В соответствии с этими методиками происходит пересчет возникающих деформаций в вес вагонов. Температура рельса влияет на его механические свойства и, соответственно, на величину его деформации. В работе впервые предложена методика, позволяющая учитывать деформацию рельса под действием нагрузки с учетом изменения его температуры при различных граничных условиях. **Метод.** Согласно предложенному подходу, вес вагона определяется по величине деформаций, которые измеряются тензометрическими датчиками, расположенными на шейке рельса. Разработанные модели включают железнодорожное колесо, шпалы и фрагмент рельса. Фрагмент рельса, соответствующий участку пути, на котором устанавливаются датчики, геометрически воспроизводит существующий тип рельса R50 и размещается на шпалах, зафиксированных с нижней стороны. Модель колеса соответствует существующему типу цельнокатаных вагонных колес с диаметром по кругу катания 920 мм, благодаря чему в модели сохраняется корректное пятно контакта. Согласно методике, на разработанные твердотельные модели накладывается конечно-элементная сетка, устанавливаются соединения между фрагментами модели, применяются граничные и температурные условия, а также воздействующие силы. Последовательно выполняется конечно-элементный анализ для всех возможных комбинаций координаты колеса, нагружаемой массы и температуры. Для каждого случая регистрируются значения деформаций в четырех узлах рельса, соответствующих местам установки тензодатчиков. Проведено сравнение результатов конечно-элементного анализа для двух разработанных твердотельных моделей. Модели отличаются способом крепления рельса к шпалам и заданием граничных условий на торцах фрагмента рельса, позволяющих учитывать возможность релаксации температурных напряжений. В модели 1 рельс жестко связан со шпалами, в модели 2 рельс и шпалы соединены контактом, допускающим движение рельса по шпале с заданным коэффициентом трения. Кроме того, в модели 2 имитируется воздействие прижимных болтов. **Основные результаты.** Методика реализована в среде мультифизического моделирования ANSYS для связанной трехмерной задачи с использованием модулей Static Structural и Steady-State Thermal. Результаты моделирования показали, что значения деформаций, обусловленные температурным воздействием, в предложенных моделях отличаются. Диапазон вертикальных деформаций фрагмента рельса, на котором закреплены тензодатчики, при нагружаемой на колесо массе 12 500 кг составляет от минус 245 мкм (изгиб вниз) до 15 мкм (изгиб вверх) для модели 1 в зависимости от температуры рельса (в диапазоне от минус 20 °С до 50 °С), а для модели 2 — от минус 225 мкм до минус 100 мкм. Это позволяет сделать вывод, что модель 2 более корректно воспроизводит процесс деформации, а воздействие температуры на деформации менее значимо по сравнению с величиной механической нагрузки. **Обсуждение.** Предлагаемая модель, в отличие от известных, предполагает статическое взвешивание, характеризуемое большей точностью, надежностью и простотой применения. В дальнейшем

планируется выполнение более подробного исследования модели с двумя колесами и осью с целью определения оптимального времени моделирования и точности получаемых результатов.

Ключевые слова

железнодорожная система мониторинга, идентификация нагрузок, метод конечных элементов, твердотельное моделирование, совершенствование моделей

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта № FENW-2020-0022 «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта» по заданию Минобрнауки Российской Федерации.

Ссылка для цитирования: Денисенко М.А., Исаева А.С., Синюкин А.С., Ковалев А.В. Модели и методика моделирования деформаций в САПР ANSYS для систем железнодорожных вагонных весов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 284–292. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-284-292

Models and a deformations simulation approach using ANSYS CAD for railway wagons weighing system

Mark A. Denisenko¹, Alina S. Isaeva², Alexander S. Sinyukin³✉, Andrey V. Kovalev⁴

^{1,2,3,4} Southern Federal University, Taganrog, 344006, Russian Federation

¹ dema.bmfe@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5044-7482>

² isaevaas@sfnedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5145-0963>

³ sinyukin@sfnedu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0496-0087>

⁴ avkovalev@sfnedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0545-7416>

Abstract

Possibility of fast, convenient and precise definition of wagons load mass allows enhancing transport safety and ensures assets accounting in railroad infrastructure. There are known three-dimensional solid models of railway track sector and approaches of simulation the deformation which emerge in rails by mechanical load effect transmitted through wagon wheels. In accordance with these approaches, emerging deformations are recomputed into wagons weight. The rail temperature influences on its mechanical properties and, consequently, on the deformation value. In this work, for the first time, a technique has been proposed that allows one to consider the deformation of the rail under the load influence, taking into account its temperature variance at different boundary conditions. According to the proposed approach, the wagon weight is defined by deformation values which are measured by strain gauges located on the rail web. The developed models include a rail wheel, ties and a rail fragment. The rail fragment corresponding to the railway track sector on which sensors are mounted geometrically replicates an existent rail type R50 and is situated on the ties fixed from bottom side. The wheel model complies with an existent solid-rolled wagon wheel type with tread diameter 920 mm, thereby correct contact patch retains in the model. According to the approach, finite-element mesh is generated on the developed solid models, connections between model fragments are established, and boundary and temperature conditions as well as acting forces are applied. Sequentially finite-element analysis is performed for all possible combination of wheel coordinate, load mass and temperature. For every case, deformation values are registered in four rail nodes corresponding to strain gauges placements. Comparison of finite-element analysis results for two developed solid models is carried out. The models differ by the way of the rail on the ties mounting and boundary condition setting on the end faces of the rail fragment, allowing to consider possibility of temperature stresses relaxation. In the model 1 the rail is connected with ties rigidly, in the model 2 the rail and the ties are connected by a contact allowing the rail motion along the tie with given friction coefficient. Besides that clamp bolts impact is imitated in the model 2. The approach is implemented within multiphysical simulation environment ANSYS for coupled three-dimensional problem using Static Structural and Steady-State Thermal modules. Simulation results showed that the deformation values determined by the temperature influence differ for the proposed models. Vertical deformations range of the rail fragment on which the strain gauges are fastened, at the mass 12,500 kg loaded on the wheel, is from –245 μm (bend down) to 15 μm (bend up) for the model 1 depending on the rail temperature (in the range from –20 °C to +50 °C) and from –225 μm to –100 μm for the model 2. This allows concluding that the model 2 reflects deformation process more correctly, and the temperature influence on the deformation is less relevant compared to mechanical load value. The proposed model in contrast to the known ones implies static weighing characterized by more accuracy, reliability and simplicity of use. In the future it is planned the executing of the more detail research of a model with two wheels and an axle for determining optimal simulation time and obtained results accuracy.

Keywords

railway monitoring system, loads identification, finite element method, solid state modeling, models updating

Acknowledgements

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the “Development and research of methods and tools for monitoring, diagnosing, and predicting the state of engineering objects based on artificial intelligence” project FENW-2020-0022.

For citation: Denisenko M.A., Isaeva A.S., Sinyukin A.S., Kovalev A.V. Models and a deformations simulation approach using ANSYS CAD for railway wagons weighing system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 284–292 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-284-292

Введение

Оценка величины нагрузки, оказываемой железнодорожным транспортом на объекты железнодорожной инфраструктуры, необходима при их разработке, мониторинге, диагностике и техническом обслуживании [1], но главное — для предотвращения случаев перегрузки, которые могут вызвать их повреждение [2, 3]. В первую очередь это относится к грузовым составам, превышение веса в вагонах которых может приводить не только к более быстрому износу и разрушению железнодорожных путей и вагонных колес, но и к сходу состава с рельсов [4, 5]. Важное значение имеет также оценка равномерности распределения грузов в вагоне [6].

Системы взвешивания в движении получили широкое распространение в области мониторинга, диагностики и контроля состояния железнодорожной инфраструктуры [7] за счет возможности выполнять измерения воздействующих нагрузок и масс вагонов без вмешательства в установленный график следования поездов. Однако точность таких систем ниже, чем у статических [5, 8–10]. Системы статического взвешивания (системы измерения статических нагрузок), в свою очередь, характеризуются высокой точностью, надежностью, простотой установки и эксплуатации. Кроме того, как показано в [9], в случае, когда скорость состава невысока, динамическими эффектами при движении состава можно пренебречь.

Для оценки величины сдвига рельса, изгибающего момента и вертикальных нагрузок используются тензометрические датчики деформаций и механического напряжения [11–13], пьезорезистивные и пьезоэлектрические системы [14, 15]. Другим распространенным средством измерения деформаций являются устройства на основе волоконной оптической решетки Брэгга [16–18]. Чаще всего датчики деформаций устанавливаются на шейке [13] или подошве [1, 19] рельса.

В работе [9] исследовано влияние неровности путей и скорости движения состава на величину нагрузок, определяемую системами взвешивания в движении, а также на основе численного моделирования выполнена оценка влияния, вносимого статическими нагрузками в измеряемые значения. Однако предлагаемый подход требует длительных вычислений и постобработки, поскольку сами измерения проводятся в динамических условиях. Оценивание статических нагрузок, приходящихся на колесо и ось во время движения, с учетом различных типов поездов, предлагается и в [5], в то время как динамические нагрузки исследуются с точки зрения влияния на них жесткости и демпфирования рельсовой прокладки, позиционирования измерительной системы и жесткости контакта. В [6] приведена методика классификации движущихся поездов при помощи системы из 6 датчиков деформации и одного датчика температуры. Качество измерений подтверждено статистическими методами, однако алгоритм зависим от полноты базы данных и предполагает калибровку модели определения нагрузок. В системе, представленной в работе [20], для определения вертикальных деформаций применены тензодатчики на основе волоконной оптической решетки Брэгга, прикрепляемые к рельсу посредством

магнитных «пластырей». Помимо динамического, производится также и статическое взвешивание, а для выявления распределения нагрузок и деформаций в рельсе использован конечно-элементный анализ.

Существует множество известных способов сравнения и совершенствования конечно-элементных моделей: вероятностные, детерминированные, основанные на анализе чувствительности или максимальном подобию, связанные с поверхностью отклика и регуляризацией [21]. Так, в [22] проведено сравнение конечно-элементных моделей участка почвы и боронного диска с целью выявить степень влияния формы, размеров и плотности размещения выпуклостей и вогнутостей на поверхности диска на силу, действующую на диск со стороны обрабатываемой почвы. В качестве инструмента для оценивания повреждений в исторических каменных строениях в [23] предложена геометрическая конечно-элементная модель исторической церкви (XVI век, Италия), максимально приближенная по своим кинематическим и динамическим характеристикам к результатам натурных измерений. Выполнено сравнение предварительных конечно-элементных моделей, отличающихся граничными условиями: в одной из моделей основание здания фиксировалось, в другой — задавалось упругими пружинными подвесками, и более приближенные к данным измерений результаты позволили разработать третью, более точную модель.

Цель настоящей работы заключается в разработке твердотельных конечно-элементных моделей и методики моделирования деформаций в железнодорожном рельсе под воздействием нагрузок для идентификации веса (массы) железнодорожных вагонов. Особенности предлагаемого подхода являются более корректное воспроизведение геометрических и физических характеристик моделируемых объектов, учет влияния температуры рельса и позиционирования вагонного колеса относительно установленных датчиков на величину деформаций и, соответственно, испытываемых нагрузок, а также исследование и уточнение граничных условий для более корректного воспроизведения моделируемого процесса.

Твердотельные модели и методика моделирования

Первая твердотельная модель (модель 1), представленная на рис. 1, а, и разработанная методика моделирования позволяют определять значения деформаций и механических напряжений в местах предполагаемой установки тензодатчиков системы железнодорожных весов [24]. Особенностью методики является учет температурных деформаций, которым рельс подвергается в процессе его эксплуатации. Модель 1 была исследована в среде ANSYS Workbench (модули Static Structural и Steady-State Thermal) с рядом допущений: рассмотрен только участок рельса длиной 1 м, лежащий на двух шпалах; рельс жестко связан со шпалами, шпалы закреплены с нижней стороны; оба торца рельса свободно деформируются в ответ на тепловое воздействие на рельс; задача считается симметричной относительно середины оси колеса, и рассматривалась только полови-

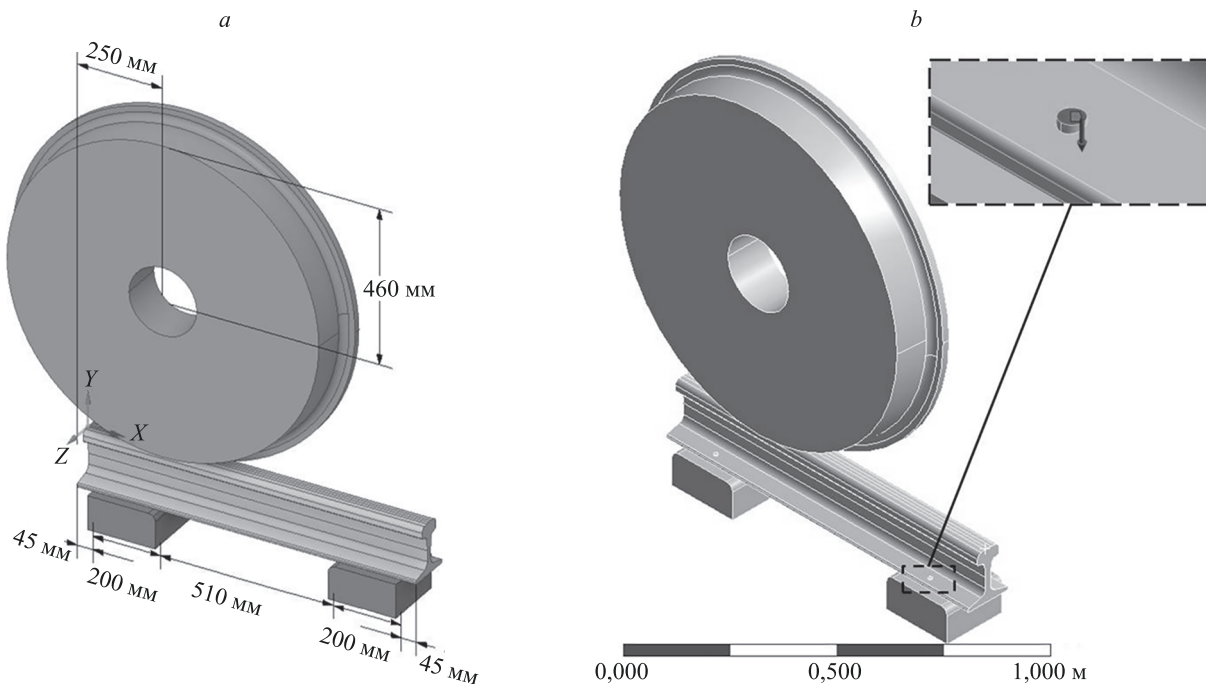


Рис. 1. Твёрдотельные модели 1 (а) и 2 (б). В увеличенном масштабе показаны прижимной болт и плоскость, на которую действует прижимная сила

Fig. 1. Solid-state models 1 (a) and 2 (b); the clamp bolt and surface on which downforce acts are shown scaled up

на структуры, т. е. один рельс и одно колесо. На рис. 2 схематично представлена железнодорожная плеть и обозначены компоненты ее фрагмента, образующие объект, исследуемый в настоящей работе.

Под воздействием температуры окружающей среды железнодорожная плеть (участок рельсового полотна, ограниченный несварными стыками, в пределах которого рельсы соединяются между собой сварным способом) удлиняется или сокращается. Можно предположить, что датчики для железнодорожных весов лучше всего располагать как можно ближе к несварному стыку, т. е. к одному из концов железнодорожной плети, поскольку в этом месте путем изменения ширины зазора несварного стыка, температурные напряжения могут релаксировать, и их вклад в вертикальную составляющую деформации рельса минимален, что должно уменьшить погрешность измерения массы же-

лезнодорожных вагонов. Таким образом, в модели 1 необходимо учесть различные условия для двух торцов рельса: возможность его удлинения со стороны несварного стыка под воздействием температуры окружающей среды и ограничение такой возможности с другой стороны ввиду того, что материал остальной массы плиты сопротивляется расширению.

Вторая твердотельная модель (модель 2) (рис. 1, б) была разработана с учетом возможности теплового расширения рельсового полотна. В данной модели ограничением возможности удлинения рельса из-за сопротивления массы плиты являются граничные условия на одном из торцов рельса, запрещающие перемещения по оси X , т. е. $\Delta\epsilon_x = 0$. Возможность удлинения рельса обеспечивается заданием в модели 2 иного типа крепления рельса к шпале. В модели 1 рельс соединен со шпалой контактом bonded (жесткое закрепление), в модели 2 — контактом frictional, который обеспечивает возможность движения рельса по шпале с заданным коэффициентом трения 0,6. Дополнительно рельс прижат к шпале в двух точках с силой 20 кН, что имитирует действия прижимных болтов или скоб. На нижних сторонах шпал граничные условия заданы в виде $\Delta\epsilon_{x,y,z} = 0$. В обоих случаях исследован диапазон нагружаемых масс от 2500 кг до 12 500 кг при расчете на одно колесо восьмиколесного вагона для трех различных температур рельса: минус 20 °С; 22 °С; 50 °С. При задании граничных условий для задачи Steady-State Thermal в случае высокой температуры для верхних поверхностей модели рельса $t = 50$ °С, для остальных поверхностей заданы условия теплообмена с коэффициентом теплопередачи 25 Вт/(м²·°С) и температурой окружающей среды 30 °С; для низкой температуры на нижней поверхности рельса $t = 0$ °С, а на остальных

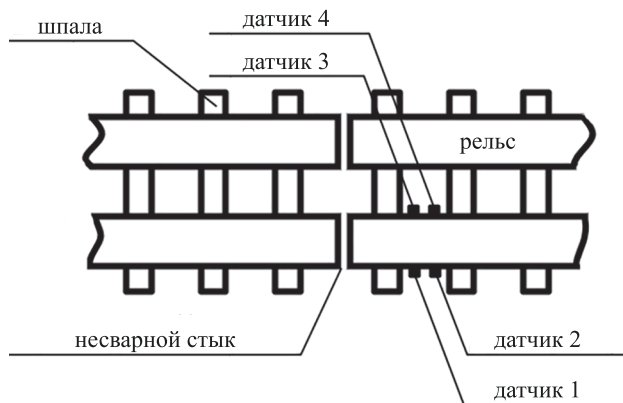


Рис. 2. Схематическое представление решаемой задачи

Fig. 2. Schematic of the solvable problem

заданы коэффициент теплопередачи $25 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$ и температура окружающей среды минус 20°С . Задача решена для следующих параметров материала колеса и рельса: плотность 7850 кг/м^3 , модуль Юнга $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $0,3$.

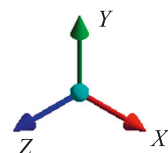
Основная задача исследования — сравнение результатов моделирования моделей 1 и 2, а именно, уточнение степени влияния температуры на значения деформаций в местах предполагаемой установки тензометрических датчиков.

Анализ результатов

В среде ANSYS Mechanical возможен расчет деформаций, возникающих в конечно-элементной модели под воздействием различных механических или температурных эффектов, по трем осям координат (трехмерный анализ). На рис. 3 показано распределение деформаций по трем осям для всей исследуемой структуры (колесо, рельс, шпалы) при следующих исходных данных: модель 2; масса нагрузки $12\,500 \text{ кг}$; температура окружающей среды 22°С ; координата геометрического центра колеса, отсчитываемая от левого края фрагмента рельса (рис. 1) 350 мм . Аналогичные исходные данные относятся к рис. 4 и 5 (за исключением значений температуры).

Модуль: Static Structural
Тип: Общая деформация
Единица измерения: 10^{-4} м

9,4022 Макс.
8,3576
7,3129
6,2682
5,2235
4,1788
3,1341
2,0894
1,0447
0 Мин.



0,000 0,500 1,000 м

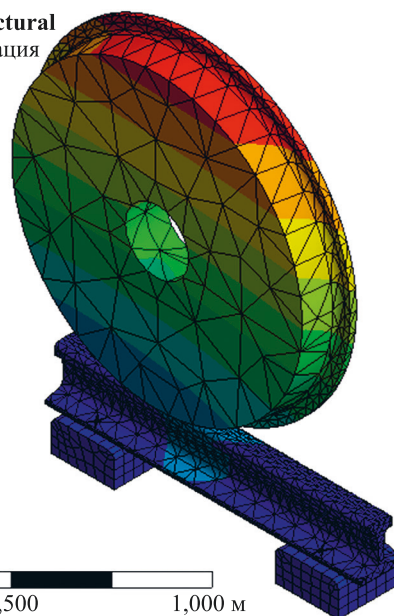


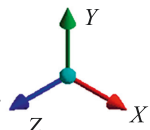
Рис. 3. Распределение деформаций в структуре при температуре 22°С

Fig. 3. Distribution of the deformations in the structure at temperature $+22^\circ\text{С}$

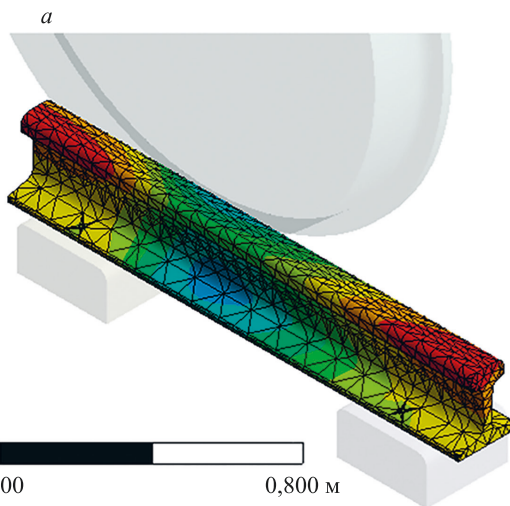
Модуль: Static Structural

Тип: Направленная деформация (по Y)
Единица измерения: 10^{-5} м

8,9525 Макс.
6,9535
4,9544
2,9554
0,9564
-1,0426
-3,0416
-5,0406
-7,0397
-9,0387 Мин.



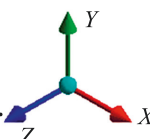
0,000 0,400 0,800 м



Модуль: Static Structural

Тип: Направленная деформация (по Y)
Единица измерения: 10^{-5} м

6,5179 Макс.
2,9533
-0,6112
-4,1758
-7,7404
-11,305
-14,869
-18,434
-21,999
-25,563 Мин.



0,000 0,400 0,800 м

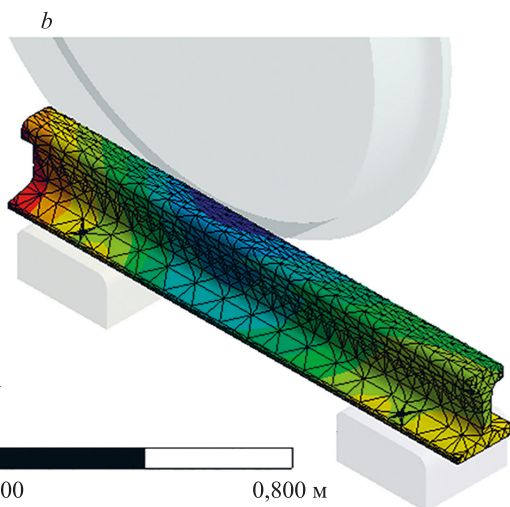


Рис. 4. Распределения деформаций по оси Y в рельсе при температурах 50°С (a) и минус 20°С (b)

Fig. 4. Distribution of the deformations along the Y axis in the rail at temperatures 50°С (a) and -20°С (b)

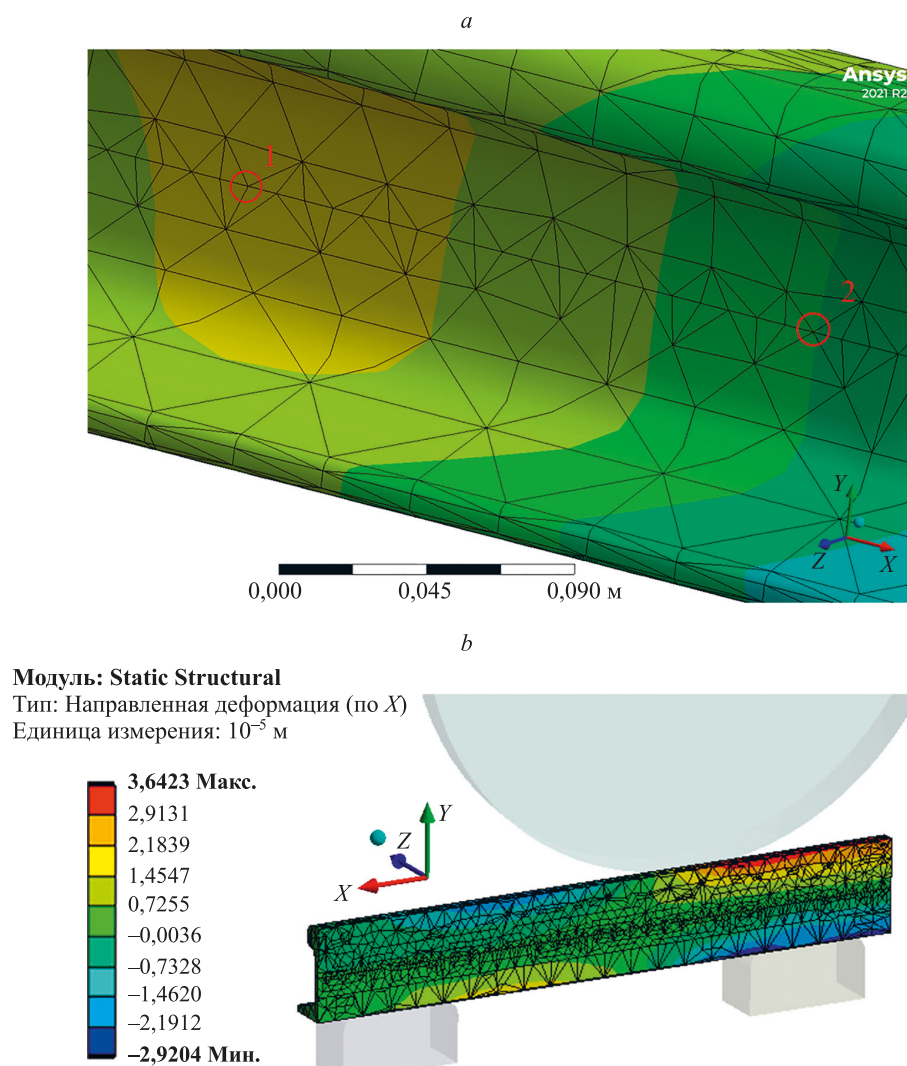


Рис. 5. Распределения деформаций: с указанием точек измерения деформации 1 и 2 (а); по оси X в сечении рельса при $t = 22^\circ\text{C}$ (b)

Fig. 5. Distribution of the deformations with indication of deformation measure nodes 1 and 2 (a); along the X axis in rail section at $t = 22^\circ\text{C}$ (b)

Результаты расчета распределения вертикальных деформаций по толщине рельса при температурах 50°C и минус 20°C представлены на рис. 4. Видно, что разница деформаций в верхней части рельса, находящейся непосредственно под колесом, для двух крайних температурных случаев достигает порядка 200 мкм .

На рис. 5, а показано распределение деформаций по трем осям в рельсе при температуре 22°C , а окружностями обозначены точки измерения деформации 1 и 2. Поскольку анализ температурных и механических воздействий в ANSYS выполняется для каждого узла конечно-элементной модели, это позволяет оценить результаты расчета распределения деформаций в том числе внутри структуры, а не только на ее поверхности (рис. 5, b).

Зависимости деформации рельса для точек измерения деформации 1 и 4 (рис. 2) от нагружаемой массы, температуры рельса и расположения центра оси колеса для моделей 1 и 2 приведены на рис. 6. В результате

сравнения моделирования для модели 1, выполненного без учета особенностей температурного влияния на протяженный рельсовый путь, с результатами модели 2 (рис. 6) можно сделать вывод, что форма зависимостей вертикальных деформаций в местах предполагаемой установки тензометрических датчиков 1 и 4 от расположения колеса на рельсе, температуры и массы нагрузки сохраняется.

Сохраняется также положение наиболее крутых участков графика, которые соответствуют диапазонам $250\text{--}450\text{ мм}$ и $650\text{--}750\text{ мм}$. Положение точки, соответствующей наибольшему прогибу рельса под воздействием нагрузки, которое для модели 1 всегда соответствовало координате 550 мм , для модели 2 не совпадает с координатой 550 мм при температуре рельса минус 20°C и соответствует координате 450 мм . В модели 1 при нагревании рельс расширялся и изгибался вверх, при охлаждении, наоборот, сжимался и изгибался вниз. Аналогичное поведение можно наблюдать и в модели 2,

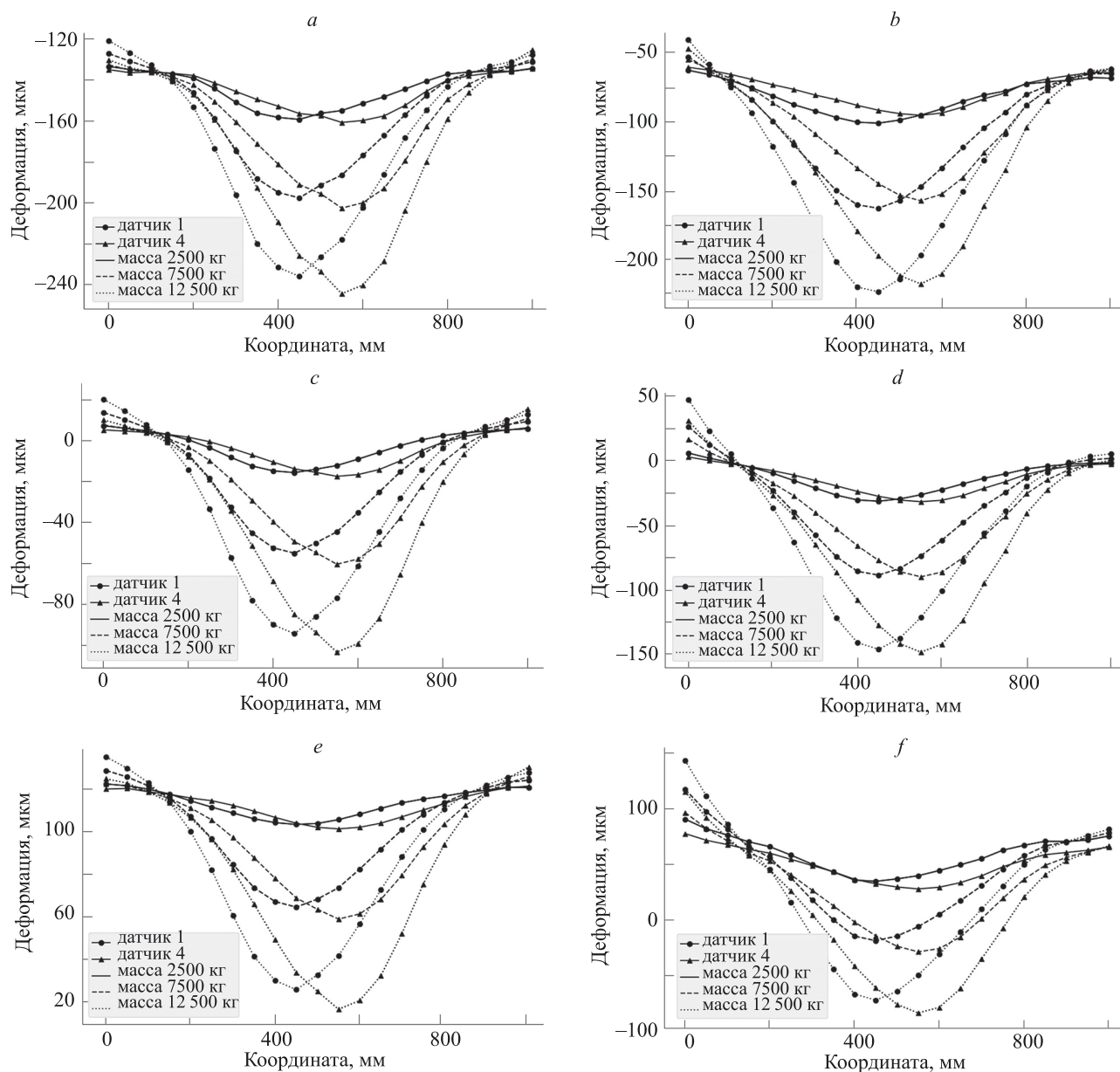


Рис. 6. Зависимости деформаций рельса в точках установки датчиков 1 и 4 от массы нагрузки и координаты колеса при температурах рельса: минус 20 °C (a, b), 22 °C (c, d), 50 °C (e, f) для моделей 1 (a, c, e) и 2 (b, d, f)

Fig. 6. Dependence of the rail deformations in sensor installation nodes 1 and 4 vs. the load mass and the wheel coordinate at rail temperatures: -20 °C (a, b), 22 °C (c, d), 50 °C (e, f) for models 1 (a, c, e) and 2 (b, d, f)

однако влияние температурных деформаций для модели 2 ниже, чем для модели 1. Так, для модели 2 при температуре 50 °C в области максимального прогиба рельса и при максимальной нагрузке вертикальные деформации принимают отрицательные значения, тогда как кривые на соответствующем графике для модели 1 находятся в области положительных значений; абсолютные значения деформаций при температуре минус 20 °C для модели 2, соответственно, оказываются ниже, чем для модели 1. Можно сделать вывод, что описанная методика учета влияния температуры окружающей среды на рельсовое полотно оправдана.

В дальнейшем планируется исследовать твердотельную модель колесной пары для определения влияния принятого в настоящей работе упрощения на величины

деформаций, а также исследовать, насколько длина рельса от места предполагаемого расположения тензодатчиков до несварного стыка влияет на эффективность определения величины нагрузки.

Заключение

В работе выполнено сравнение конечно-элементных моделей системы взвешивания железнодорожных вагонов, а также разработаны и уточнены методики моделирования. По результатам исследования модели 1 и модели 2, которая отличается от модели 1 граничными условиями, более релевантно воспроизводящими особенности механического взаимодействия компонентов модели, установлено, что:

- согласно результатам моделирования максимальная величина вертикальной деформации участка рельса, на котором закреплен тензодатчик, при полной загруженности вагона составляет для модели 1 от минус 245 мкм (изгиб вниз) до 15 мкм (изгиб вверх) в зависимости от температуры рельса, а для модели 2 — от минус 225 мкм до минус 100 мкм (изгиб рельса вниз в обоих случаях);
- степень влияния температурных условий на величину вертикальных деформаций рельса в условиях модельного эксперимента (модель 2) оказывается меньше по сравнению с влиянием температуры в первом эксперименте (модель 1);

- полученные результаты деформаций позволяют устанавливать значение нагружаемой массы при условии известной координаты колеса и температуры рельса в момент измерения деформации.

В качестве развития темы настоящей работы планируется провести более подробное исследование модели с двумя колесами и осью с целью определения оптимального с точки зрения времени моделирования и точности получаемых результатов способа построения твердотельной модели для моделирования систем вагонных весов. Также предполагается разработка методики использования искусственных нейронных сетей для уточнения показаний вагонных весов.

Литература

1. Pau A., Vestroni F. Weigh-in-motion of train loads based on measurements of rail strains // *Structural Control Health Monitoring*. 2021. V. 28. N 11. P. e2818. <https://doi.org/10.1002/stc.2818>
2. Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R. Automatic detection of squats in railway infrastructure // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014. V. 15. N 5. P. 1980–1990. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2307955>
3. Xu L., Zhai W. Train-track coupled dynamics analysis: system spatial variation on geometry, physics and mechanics // *Railway Engineering Science*. 2020. V. 28. N 1. P. 36–53. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00203-0>
4. Molodova M., Li Z., Dollevoet R. Axle box acceleration: measurement and simulation for detection of short track defects // *Wear*. 2011. V. 271. N 1-2. P. 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.003>
5. Pintão B., Mosleh A., Vale C., Montenegro P., Costa P. Development and validation of a weigh-in-motion methodology for railway tracks // *Sensors*. 2022. V. 22. N 5. P. 1976. <https://doi.org/10.3390/s22051976>
6. Zakharenko M., Frøseth G.T., Rönquist A. Train classification using a weigh-in-motion system and associated algorithms to determine fatigue loads // *Sensors*. 2022. V. 22. N 5. P. 1772. <https://doi.org/10.3390/s22051772>
7. Allota B., D'Adamio P., Marini L., Meli E., Pugi L., Rindi A. A new strategy for dynamic weighing in motion of railway vehicles // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015. V. 16. N 6. P. 3520–3533. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477104>
8. Senyanskiy D.M. Problem of increasing the accuracy of railway carriages weighing in motion // *Proc. of the XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium*. 2003. P. 374–377.
9. Mosleh A., Costa P.A., Calçada R. A new strategy to estimate static loads for the dynamic weighing in motion of railway vehicles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020. V. 234. N 2. P. 183–200. <https://doi.org/10.1177/0954409719838115>
10. Mosleh A., Costa P.A., Calçada R. Development of a low-cost trackside system for weighing in motion and wheel defects detection // *International Journal of Railway Research*. 2020. V. 7. N 1. P. 1–9.
11. Costa B.J.A., Martins R., Santos M., Felgueiras C., Calçada R. Weighing-in-motion wireless system for sustainable railway transport // *Energy Procedia*. 2017. V. 136. P. 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.260>
12. Meli E., Pugi L. Preliminary development, simulation and validation of a weigh in motion system for railway vehicles // *Meccanica*. 2013. V. 48. N 10. P. 2541–2565. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9769-9>
13. Zhou W., Abdulkhakeem S., Fang C., Han T., Li G., Wu Y., Faisal Y. A new wayside method for measuring and evaluating wheel-rail contact forces and positions // *Measurement*. 2020. V. 166. P. 108244. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108244>
14. Delprete C., Rosso C. An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. V. 23. N 3. P. 940–956. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.004>
15. Sekula K., Kołakowski P. Piezo-based weigh-in-motion system for the railway transport // *Structural Control Health Monitoring*. 2012. V. 19. N 2. P. 199–215. <https://doi.org/10.1002/stc.416>

References

1. Pau A., Vestroni F. Weigh-in-motion of train loads based on measurements of rail strains. *Structural Control Health Monitoring*, 2021, vol. 28, no. 11, pp. e2818. <https://doi.org/10.1002/stc.2818>
2. Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R. Automatic detection of squats in railway infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, vol. 15, no. 5, pp. 1980–1990. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2307955>
3. Xu L., Zhai W. Train-track coupled dynamics analysis: system spatial variation on geometry, physics and mechanics. *Railway Engineering Science*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 36–53. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00203-0>
4. Molodova M., Li Z., Dollevoet R. Axle box acceleration: measurement and simulation for detection of short track defects. *Wear*, 2011, vol. 271, no. 1-2, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.003>
5. Pintão B., Mosleh A., Vale C., Montenegro P., Costa P. Development and validation of a weigh-in-motion methodology for railway tracks. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 1976. <https://doi.org/10.3390/s22051976>
6. Zakharenko M., Frøseth G.T., Rönquist A. Train classification using a weigh-in-motion system and associated algorithms to determine fatigue loads. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 1772. <https://doi.org/10.3390/s22051772>
7. Allota B., D'Adamio P., Marini L., Meli E., Pugi L., Rindi A. A new strategy for dynamic weighing in motion of railway vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 3520–3533. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477104>
8. Senyanskiy D.M. Problem of increasing the accuracy of railway carriages weighing in motion. *Proc. of the XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium*, 2003, pp. 374–377.
9. Mosleh A., Costa P.A., Calçada R. A new strategy to estimate static loads for the dynamic weighing in motion of railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2020, vol. 234, no. 2, pp. 183–200. <https://doi.org/10.1177/0954409719838115>
10. Mosleh A., Costa P.A., Calçada R. Development of a low-cost trackside system for weighing in motion and wheel defects detection. *International Journal of Railway Research*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 1–9.
11. Costa B.J.A., Martins R., Santos M., Felgueiras C., Calçada R. Weighing-in-motion wireless system for sustainable railway transport. *Energy Procedia*, 2017, vol. 136, pp. 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.260>
12. Meli E., Pugi L. Preliminary development, simulation and validation of a weigh in motion system for railway vehicles. *Meccanica*, 2013, vol. 48, no. 10, pp. 2541–2565. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9769-9>
13. Zhou W., Abdulkhakeem S., Fang C., Han T., Li G., Wu Y., Faisal Y. A new wayside method for measuring and evaluating wheel-rail contact forces and positions. *Measurement*, 2020, vol. 166, pp. 108244. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108244>
14. Delprete C., Rosso C. An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, no. 3, pp. 940–956. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.004>

16. Filograno M.L., Guillén P.C., Rodríguez-Barrios A., Martín-López S., Rodríguez-Plaza M., Andrés-Alguacil A., González-Herráez M. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. N 1. P. 85–92. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2135848>
17. Kouroussis G., Kinet D., Moeyaert V., Dupuy J., Caucheteur C. Railway structure monitoring solutions using fibre Bragg grating sensors // *International Journal of Rail Transportation*. 2016. V. 4. N 3. P. 135–150. <https://doi.org/10.1080/23248378.2016.1184598>
18. Roveri N., Carcaterra A., Sestieri A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. V. 60–61. P. 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.003>
19. Johansson A., Nielsen J.C.O. Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2003. V. 217. N 2. P. 135–145. <https://doi.org/10.1243/095440903765762878>
20. Vendittozzi C., Ciro E., Felli F., Lupi C., Marra F., Pulci G., Astri A. Static and dynamic weighing of rolling stocks by mean of a customized FBG-sensorized-patch // *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2020. V. 10. N 1. P. 83–88. <https://doi.org/10.18280/ijss.100111>
21. Ereiz S., Duvnjak I., Jiménez-Alonso J.F. Review of finite element model updating methods for structural applications // *Structures*. 2022. V. 41. P. 684–723. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.041>
22. Chirende B., Li J.Q., Vheremu W. Application of finite element analysis in modeling of bionic harrowing discs // *Biomimetics*. 2019. V. 4. N 3. P. 61. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4030061>
23. Baggio C., Sabbatini V., Santini S., Sebastiani C. Comparison of different finite element model updates based on experimental onsite testing: the case study of San Giovanni in Macerata // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021. V. 11. N 3. P. 767–790. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00480-1>
24. Denisenko M.A., Isaeva A.S., Sinyukin A.S., Kovalev A.V. A method for measuring the mass of a railroad car using an artificial neural network // *Infrastructures*. 2024. V. 9. N 2. P. 31. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020031>
15. Sekula K., Kolakowski P. Piezo-based weigh-in-motion system for the railway transport. *Structural Control Health Monitoring*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 199–215. <https://doi.org/10.1002/stc.416>
16. Filograno M.L., Guillén P.C., Rodríguez-Barrios A., Martín-López S., Rodríguez-Plaza M., Andrés-Alguacil A., González-Herráez M. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2135848>
17. Kouroussis G., Kinet D., Moeyaert V., Dupuy J., Caucheteur C. Railway structure monitoring solutions using fibre Bragg grating sensors. *International Journal of Rail Transportation*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 135–150. <https://doi.org/10.1080/23248378.2016.1184598>
18. Roveri N., Carcaterra A., Sestieri A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 60–61, pp. 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.003>
19. Johansson A., Nielsen J.C.O. Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2003, vol. 217, no. 2, pp. 135–145. <https://doi.org/10.1243/095440903765762878>
20. Vendittozzi C., Ciro E., Felli F., Lupi C., Marra F., Pulci G., Astri A. Static and dynamic weighing of rolling stocks by mean of a customized FBG-sensorized-patch. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 83–88. <https://doi.org/10.18280/ijss.100111>
21. Ereiz S., Duvnjak I., Jiménez-Alonso J.F. Review of finite element model updating methods for structural applications. *Structures*, 2022, vol. 41, pp. 684–723. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.041>
22. Chirende B., Li J.Q., Vheremu W. Application of finite element analysis in modeling of bionic harrowing discs. *Biomimetics*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 61. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4030061>
23. Baggio C., Sabbatini V., Santini S., Sebastiani C. Comparison of different finite element model updates based on experimental onsite testing: the case study of San Giovanni in Macerata. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 767–790. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00480-1>
24. Denisenko M.A., Isaeva A.S., Sinyukin A.S., Kovalev A.V. A method for measuring the mass of a railroad car using an artificial neural network. *Infrastructures*, 2024, vol. 9, no. 2, pp. 31. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020031>

Авторы

Денисенко Марк Анатольевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Южный федеральный университет, Таганрог, 344006, Российская Федерация, [sc 55935578400](https://orcid.org/0000-0001-5044-7482), <https://orcid.org/0000-0001-5044-7482>, dema.bmfe@gmail.com

Исаева Алина Сергеевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южный федеральный университет, Таганрог, 344006, Российская Федерация, [sc 56372192800](https://orcid.org/0000-0002-5145-0963), <https://orcid.org/0000-0002-5145-0963>, isaevaas@sfsedu.ru

Синюкин Александр Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южный федеральный университет, Таганрог, 344006, Российская Федерация, [sc 57220806250](https://orcid.org/0000-0003-0496-0087), <https://orcid.org/0000-0003-0496-0087>, sinyukin@sfsedu.ru

Ковалев Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Южный федеральный университет, Таганрог, 344006, Российская Федерация, [sc 57213917330](https://orcid.org/0000-0003-0545-7416), <https://orcid.org/0000-0003-0545-7416>, avkovalev@sfsedu.ru

Authors

Mark A. Denisenko — PhD, Leading Researcher, Southern Federal University, Taganrog, 344006, Russian Federation, [sc 55935578400](https://orcid.org/0000-0001-5044-7482), <https://orcid.org/0000-0001-5044-7482>, dema.bmfe@gmail.com

Alina S. Isaeva — PhD, Senior Researcher, Southern Federal University, Taganrog, 344006, Russian Federation, [sc 56372192800](https://orcid.org/0000-0002-5145-0963), <https://orcid.org/0000-0002-5145-0963>, isaevaas@sfsedu.ru

Alexander S. Sinyukin — PhD, Senior Researcher, Southern Federal University, Taganrog, 344006, Russian Federation, [sc 57220806250](https://orcid.org/0000-0003-0496-0087), <https://orcid.org/0000-0003-0496-0087>, sinyukin@sfsedu.ru

Andrey V. Kovalev — D.Sc., Associate Professor, Chief Researcher, Southern Federal University, Taganrog, 344006, Russian Federation, [sc 57213917330](https://orcid.org/0000-0003-0545-7416), <https://orcid.org/0000-0003-0545-7416>, avkovalev@sfsedu.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2023

Одобрена после рецензирования 15.02.2024

Принята к печати 17.03.2024

Received 10.11.2023

Approved after reviewing 15.02.2024

Accepted 17.03.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»