

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193

Расчет движения подвижного состава по железнодорожному пути сеточно-характеристическим методом

^{1,2}Кожемяченко А.А.

¹Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, <https://www.niisi.ru/>

Москва 117218, Российская Федерация

E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru

Поступила 04.05.2023, рецензирована 11.05.2023, принята 18.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

Аннотация: Для численного моделирования движения подвижного состава по железнодорожному пути, проложенному по земляному полотну и мосту, предложено использовать сеточно-характеристический метод. Железнодорожный путь представлен с использованием динамической системы уравнений теории упругости гиперболического типа. Сеточно-характеристический метод опирается на характеристические свойства рассматриваемой системы и использует конечно-разностные схемы высокого порядка точности для получения пространственно-временного решения. Особенности железнодорожных конструкций учитываются путем изменения граничных условий и условий на контактных границах. Для расчета поведения участков контакта колесных пар подвижного состава с рельсом – системы "колесо-рельс" – использовано ранее разработанное граничное условие, модифицированное так, чтобы учитывать многоэлементные подвижные составы. В результате компьютерного моделирования движения подвижного состава по железнодорожному пути различного типа получены полноволновые картины распределения напряжений в конструкции пути, что позволяет прогнозировать опасные участки движения подвижного состава.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, сеточно-характеристический метод, колесо-рельс, подвижной состав, железнодорожный путь

УДК 519.63

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2022-0005 "Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем", Рег. № 1021060708369-1-1.2.1.

Для цитирования: Кожемяченко А.А. Расчет движения подвижного состава по железнодорожному пути сеточно-характеристическим методом. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023 15(2):193-198. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193.

Calculation of rolling stock movement along the railway track by the grid-characteristic method

^{1,2}Anton A. Kozhemyachenko

¹Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

²Scientific Research Institute of System Analysis of RAS, <https://www.niisi.ru/>

Moscow 117218, Russian Federation

E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru

Received May 04, 2023, peer-reviewed May 11, 2023, accepted May 18, 2023

Abstract: The application of a grid-characteristic method is proposed for numerical simulation of the movement of rolling stock along a railway track laid on an earth and a bridge. In the study, the railway track is presented using a dynamic system of equations of the theory of elasticity of hyperbolic type. The grid-characteristic method relies on the characteristic properties of the system under consideration and uses finite-difference schemes of high order of accuracy to obtain a space-time solution. The features of railway structures are considered by changing the boundary conditions and conditions at the contact borders. To simulate the areas of contact of wheel pairs of rolling stock with the rail – the "wheel-rail" system – a previously developed pressure boundary condition is applied, modified so as to consider multi-element rolling stock. As a result of computer simulation of the movement of rolling stock along the railway track of various types, full-wave stress distribution in the track structure is obtained, which makes it possible to predict dangerous sections of rolling stock movement.

Keywords: computer simulation, grid-characteristic method, wheel-rail, rolling stock, railway track
UDC 519.63

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" on the topic No. FNEF-2022-0005 "Mathematical Modeling of Dynamic Processes in Deformable and Reacting Media using Multiprocessor Computing Systems", Reg. No. 1021060708369-1-1.2.1.

For citation: Anton A. Kozhemyachenko. Calculation of the movement of rolling stock along the railway track by the grid-characteristic method. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):193-198e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (194)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (194)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (196)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (197)

ЛИТЕРАТУРА (197)

1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи мониторинга и безопасности при совершении железнодорожных перевозок имеют большое значение для развития тяжеловесного и высокоскоростного движений подвижных составов в различных условиях эксплуатации. Большое внимание уделено проблемам моделирования усилия в системе "колесо-рельс", анализу пятен контакта и моделям износа колесных пар и рельсов [1-5], особенностям проектирования пути [6-7], движению по балластному и с ездой по плитам железнодорожному пути [8-10].

Для численного моделирования этого класса задач зачастую применяются конечно-элементные подходы, методы Галеркина [11-15], в том числе с использованием коммерческого

программного обеспечения ANSYS, ABAQUS и др.

В настоящей работе предложено использовать сеточно-характеристический метод, позволяющий рассматривать задачи движения подвижного состава в различных условиях эксплуатации в динамической постановке и исследовать влияние волновых процессов при движении подвижного состава с использованием конечно-разностных схем высокого порядка точности по времени и пространству [16-18].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного моделирования задачи движения железнодорожного состава железнодорожное полотно представляется в виде набора слоев изотропной линейно-упругой среды, описываемой в двумерном случае системой уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = (v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} \\ -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где в (2) \mathbf{q} – вектор искомых функций, к числу которых относятся компоненты скорости распространения возмущения \mathbf{v} и компоненты симметричного тензора напряжений Коши σ , в (3) λ, μ – параметры Ламе, определяющие упругие свойства материала, ρ – плотность среды. Матрицы $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ имеют набор собственных значений $\{c_p, -c_p, c_s, -c_s, 0\}$, где $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ – скорость распространения продольных волн, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ – скорость распространения поперечных волн. Таким образом, исходная система (1) является гиперболической, а значит матрицы $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ могут быть представлены в виде

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Omega}^{-1},$$

где матрица $\mathbf{\Omega}$ состоит из столбцов, являющихся правыми собственными векторами исходной матрицы, которые, в свою очередь, отвечают собственным значениям, которые являются элементами диагональной матрицы $\mathbf{\Lambda}$. Расщепляя систему (1) по пространственным направлениям и используя переход к инвариантам Римана $\omega = \mathbf{\Omega}^{-1}\mathbf{q}$, которые переносятся по характеристикам гиперболической системы, получим гиперболическую систему из линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами в инвариантах Римана

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Система в инвариантах Римана (4) на верхнем слое по времени может быть численно проинтегрирована с использованием

конечно-разностных схем, например, при помощи схемы Русанова [19], используемой при расчетах в настоящей работе, третьего порядка по времени и пространству. Для перехода к компонентам \mathbf{v} и σ на верхнем слое по времени после расчета инвариантов Римана используется обратное преобразование $\mathbf{q} = \mathbf{\Omega}\omega$.

Принципиальная модель устройства железнодорожного пути, проложенного по земляному полотну, приведена на Рис. 1, а в условиях мостового сооружения на Рис. 2. Характеристики сред приведены в Таблице 1. Общая длина участка пути в обоих случаях составляла 25 м. На границах сред, являющихся элементами соответствующей модели, ставились условия свободной границы

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (5)$$

где \mathbf{n} – нормаль к соответствующей границе.

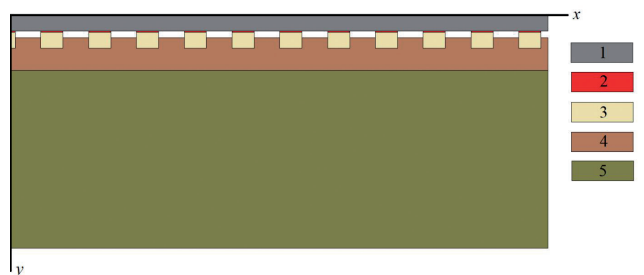


Рис. 1. Железнодорожный путь, проложенный по земляному полотну: 1 – рельс, 2 – демпферы, 3 – шпалы, 4 – балласт, 5 – земляное полотно.

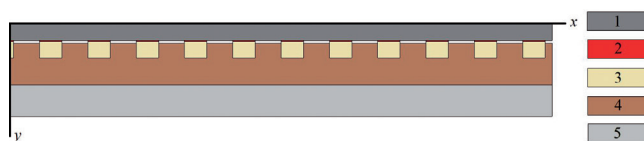


Рис. 2. Железнодорожный путь на мосту: 1 – рельс, 2 – демпферы, 3 – шпалы, 4 – балласт, 5 – несущая конструкция.

Таблица 1

Параметры моделируемых сред.			
Среда	Скорость Р-волн, м/с	Скорость S-волн, м/с	Плотность, кг/м³
Рельеф	5740	3092	7800
Демпфер	700	120	1200
Шпала	4200	2200	2500
Балласт	500	300	1400
Земляное полотно	2000	1000	2000
Несущая конструкция	4200	2200	2500

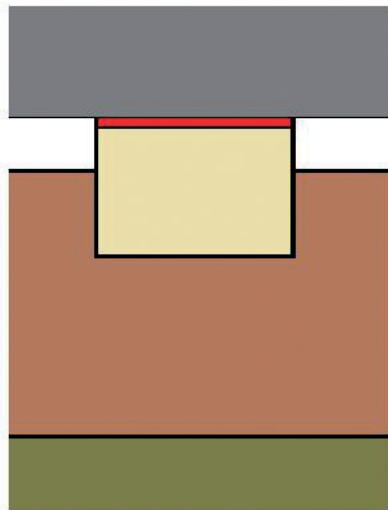


Рис. 3. Положение демпфера (красный) между рельсом и шпалой.

Между контактными средами (среда 1 и среда 2) ставится условие полного сцепления на контактной границе, которое описывается выражениями

$$v_1 = v_2,$$

$$\sigma_1 \cdot n = \sigma_2 \cdot n,$$

здесь n – нормаль к границе контактирующей среды 1.

На левой и правой границах областей интегрирования на Рис. 1 и Рис. 2 используются условия поглощения. Аналогично, это условие используется и для нижней границы области интегрирования на Рис. 1 для слоя осадочных пород. В случае мостового сооружения на нижней границе несущей конструкции задается условие свободной границы (5). Между рельсом и шпалой в обоих постановках используется демпфер, для наглядности вынесенный отдельно на Рис. 3.

Для моделирования прохождения подвижного состава по железнодорожному пути из Рис. 1 и Рис. 2 использовалось граничное условие усилия в системе "колесо-рельс" из [16] с модификацией, позволяющей учитывать сразу несколько элементов подвижного состава на Рис. 4. Геометрические параметры элемента подвижного состава составляли $H_{TRAIN} = 7.7$ м, $L_{TRAIN} = 1.85$ м, масса 90 т. Давление колеса без дефектов на рельс в системе "колесо-рельс" бралось равным 188 МПа.

В расчете области интегрирования на Рис. 1 и Рис. 2 покрывались прямоугольными

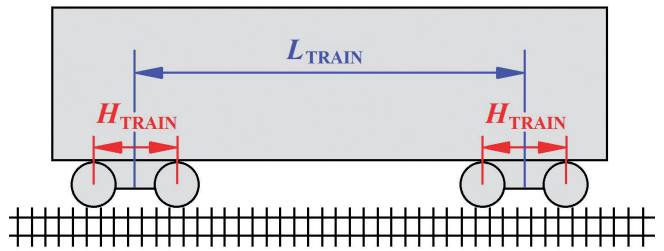


Рис. 4. Элемент подвижного состава.

Таблица 2

Параметры расчетной сетки.

Среда	Шаг вдоль OX, м	Шаг вдоль OY, м
Рельс	0.01	0.005
Демпфер	0.01	0.001
Шпала	0.01	0.005
Баласт	0.01	0.005
Земляное полотно	0.01	0.010
Несущая конструкция	0.01	0.010

расчетными сетками с постоянным шагом для соответствующей среды согласно Таблице 2, шаг интегрирования по времени составлял 10^{-7} с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 5 и Рис. 6 приведены результаты расчетов динамического распределения нагрузки

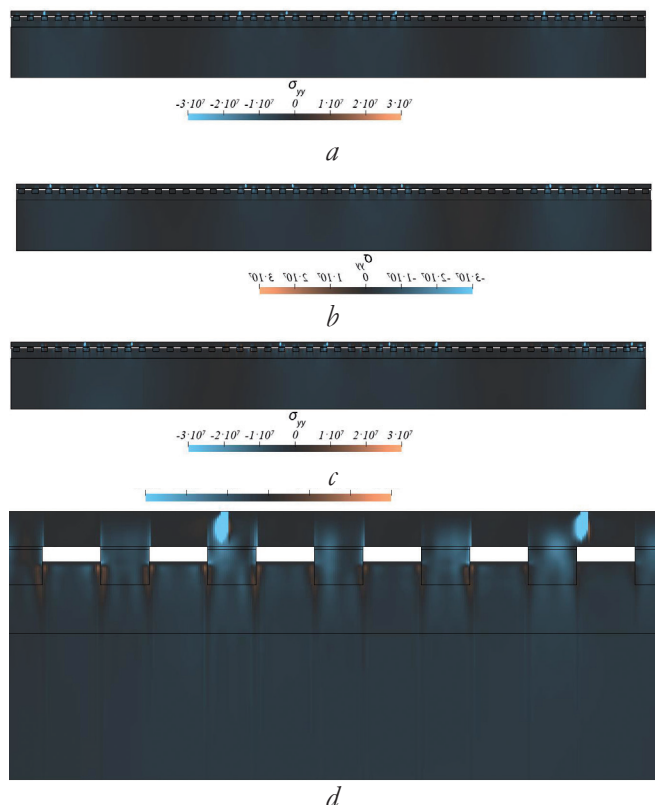


Рис. 5. Движение подвижного состава из двух элементов по земляному полотну: а – начало движения, б – 0.0255 с, с – 0.051 с, d – укрупненная картина слева в момент 0.051 с.



Рис. 6. Движение подвижного состава из двух элементов по мосту: *a* – начало движения, *b* – 0.0255 с, *c* – 0.051 с, *d* – укрупненная картина слева в момент 0.051 с.

вертикальной компоненты тензора напряжений Коши в различные моменты времени при движении подвижного состава, состоящего из двух элементов, по железнодорожному пути, проложенному по земляному полотну со скоростью 120 км/ч и на мосту со скоростью 72 км/ч соответственно. Для учета медленного возрастания напряжений вследствие взаимодействия поезда и рельса от нуля до заданного значения в системе "колесо-рельс" произведено 170000 итераций по времени. Общее количество итераций по времени составило 680000, т.е. общее время движения подвижного состава составило 0.051 с.

Полученные результаты показывают важность учета в математической модели ряда актуальных норм проектирования пути, часть из которых не была учтена ранее в работах [16-18]: наличие демпфирующего слоя между рельсами и шпалами, использование железобетонных шпал, в отличие от деревянных. Благодаря используемой модификации граничного условия возможно задание подвижного состава, состоящего из большого числа элементов.

При сравнении волновых картин на Рис. 5 и Рис. 6 видно, что при движении на мосту в конструкции моста в зоне стыка рельс-демпфер-шпала образуется более выраженная картина напряжений, чем при движении по земляному полотну. Это обусловлено тем, что в случае движения по земляному полотну волновой фронт уходит в толщу осадочных пород, тогда как на нижней поверхности моста происходит переотражение приходящего волнового фронта обратно в конструкцию пути.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием сеточно-характеристического метода на структурированных прямоугольных сетках в комбинации с модификацией граничного условия для системы "колесо-рельс" возможно получение распределений напряжений при движении подвижного состава, состоящего из большого числа элементов, по железнодорожному пути в различные моменты времени. Предложенный подход и математические модели позволяют учитывать демпферный слой между рельсами и шпалами, изменять параметры и вид конструкции, используя различные виды контактных и граничных условий, скоростной режим. Полученные алгоритмы и модели могут быть использованы для анализа волновых эффектов при движении подвижного состава и постановки задачи прохождения подвижного состава в условиях перехода от железнодорожного пути, проложенного по земляному полотну, к пути, проложенному в условиях мостового сооружения, с учетом изменения жесткости подрельсового основания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Six K, Mihalj T, Trummer G, Marte C, Krishna VV, Nia SH, Stichel S. Assessment of running gear performance in relation to rolling contact fatigue of wheels and rails based on stochastic simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2019, 234(4):0954409719879600. DOI: 10.1177/0954409719879600.
2. Goryacheva I, Torskaya EV. Modeling the Accumulation of Contact Fatigue Damage in Materials with Residual Stresses under Rolling

- Friction. *Journal of Friction and Wear*, 2019, 40(1):33-38.
3. Torskaya EV, Goryacheva IG, Muravyeva TI, Shcherbakova OO, Tsukanov IY, Meshcheryakova AR, Shkaley IV, Zagranichnik KL, Zakharov SM, Shur EA. Rolling Contact Fatigue Damage in Welded Rail Steel Joints. *Physical Mesomechanics*, 2023, 26(1):7-18; doi: 10.1134/S1029959923010022.
 4. Loktev AA, Korolev VV, Shishkina IV, Basovsky DA. Modeling the Dynamic Behavior of the Upper Structure of the Railway Track. *Procedia Engineering*, 2017, 189:133-137. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.022.
 5. Huang YB, Shi LB, Zhao XJ, Cai ZB, Liu QY, Wang WJ. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under dry condition. *Wear*, 2018, 400:62-73. DOI: 10.1016/j.wear.2017.12.020.
 6. Zakeri JA, Rezvani FH. Failures of railway concrete sleepers during service life. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 1(1):1-5.
 7. Ngamkhanong C, Kaewunruen S, Costa BJA. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring. *Infrastructures*, 2018, 3(1):3.
 8. Liu K, Lombaert G, De Roeck G. Dynamic analysis of multi-span viaducts under the passage of the train using a substructure approach. *Bridge Engineering*, 2014, 19(1):83-90.
 9. Poliakov V, Dang TN. Wheel-rail impact interaction on the high-speed railroad bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*, 2019, 6(1):15SATS119.
 10. Charoenwong C, Connolly DP, Colaco A, Alves Costa P, Woodward PK, Romero A, Galvin P. Railway slab vs ballasted track: A comparison of track geometry degradation. *Construction and Building Materials*, 378:131121.
 11. Adak D, Pramod A, Ooi E, Natarajan S. A combined virtual element method and the scaled boundary finite element method for linear elastic fracture mechanics. *Eng. Anal. Boundary Elem*, 2020, 113:9-16.
 12. Tang Z, Liu F, Guo S, Chang J, Zhang J. Evaluation coupled finite element/meshfree method for a robust full-scale crashworthiness simulation of railway vehicles. *Adv. Mech. Eng*, 2016, 8:1687814016642954.
 13. Nejad R, Liu Z, Ma W, Berto F. Reliability analysis of fatigue crack growth for rail steel under variable amplitude service loading conditions and wear. *Int. J. Fatigue*, 2021, 152:106450.
 14. Krishnamoorthy RR, Saleheen Z, Effendy A, Alisibramulisi A, Awaludin A. The Effect of Rubber Pads on The Stress Distribution for Concrete Railway Sleepers. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, 431(11):112007.
 15. Shahraki M, Warnakulasooriya C, Witt KJ. Numerical Study of Transition Zone Between Ballasted and Ballastless Railway Track. *Transportation Geotechnics*, 2015, 3:58-67.
 16. Kozhemyachenko AA, Petrov IB, Favorskaya AV, Khokhlov NI. Boundary conditions for modeling the impact of wheels on railway track. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2020, 60(9):1539-1554.
 17. Kozhemyachenko AA, Petrov IB, Favorskaya AV. Calculation of the stress state of a railway track with unsupported sleepers using the grid-characteristic method. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2021, 62:344-350.
 18. Koyhemzachenko AA, Kabanova AS, Petrov IB, Favorskaya AV. Modeling Movement of Train Along Bridge by Grid-Characteristic Method. Smart Modelling For Engineering Systems. *Smart innovation, Systems and Technologies*, 2021, 214:165-174.
 19. Favorskaya A, Khokhlov N. Accounting for curved boundaries in rocks by using curvilinear and Chimera grids. *Procedia Computer Science*, 2021, 192:3787-3794.

Кожемяченко Антон Андреевич

аспирант

Московский физико-технический институт
 Долгопрудный 141700, Московская обл., Россия
 E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru.