

УДК 629.3.022

Д. Г. Бейн, Е. А. Исполова, Ю. Б. Житков, Р. А. Сахаров
Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны»

КОНСТРУКЦИЯ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТЕЛЕЖКИ

Дата поступления 19.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 21.10.2015

Аннотация: В настоящей работе изложены результаты разработки металлоконструкции опытного образца магнитолевитационной тележки для перевозки контейнеров с использованием технологии магнитодинамической левитации «Inductrack». Представлено описание вариантов конструкции и результаты расчета на прочность.

Ключевые слова: магнитная левитация, расчет на прочность, метод конечных элементов, перевозка контейнеров.

D. G. Beyn, E. A. Ispolova, Y. B. Zhitkov, R. A. Sakharov
Joint stock company «Scientific Implementation center «Wagons»

DESIGN AND ASSESSMENT OF STRENGTH MAGNETO-LEVITATION BOGIE

Abstract: The article presents the results of the prototype magneto-levitation bogie for the transport of containers using the technology of magneto-dynamic levitation «Inductrack».

The main elements of the prototype bogie are:

- supporting welded steel frame, which is attached to the container stops, blocks, magnets, support and guide wheels;
- the magnets are combined into blocks according to the scheme «an Array of Halbach»;
- shunting wheel required for pre-acceleration of the bogie (with levitation wheels not touching the track structure);
- guide wheels, which serve for centering the bogie on the road when driving on a plot of acceleration.

Cart design was developed taking into account the possibility of placing massive superconductors instead of permanent magnets.

Carts are designed to carry containers of various types, it does not require additional devices for connecting the carriages together.

To assess the strength of the construction was taken following calculation modes:

- the moving bogie, when you turn on linear synchronous motor, a trolley supported by shunting wheel and operate the inertial load;
- braking when the bogie is in magneto-levitation flight support with the maneuvering of the wheel is missing, there are inertial load;

- support bogie magnets on when the bogie is in magneto-levitation flight;
- support the trolley on the shunting wheel, the linear synchronous motor is turned off.

The calculation was carried out by finite element method using the design package «Ansys Workbench».

Keywords: magnetic levitation, strength analysis, finite element method, transport of containers.

Введение

В монографии [1] отмечено, что создание и внедрение инновационных технологий в сфере транспортной инфраструктуры являются жизненно важными вопросами для экономики Российской Федерации.

Актуальным направлением инновационного развития транспортной инфраструктуры является внедрение технологии магнитодинамической левитации в область грузовых перевозок, в частности для перевозки контейнеров.

Перспективной магнитолевитационной технологией для перевозки контейнеров является технология магнитодинамической левитации «Inductrack».

В технологии магнитодинамической левитации «Inductrack» используются постоянные магниты [2], при этом для их работы не требуется криогенное охлаждение. Преимуществом указанной технологии является высокий зазор между активной частью путевой структуры и магнитами, установленными на транспортном средстве (до 100 мм) [3].

Путевая структура при использовании технологии «Inductrack» состоит из участков разгона, необходимого для набора предлевитационной скорости, стоянки, торможения и активной части. Активная часть путевой структуры состоит из двух треков левитации и боковой стабилизации и расположенного между ними статора тягового линейного синхронного двигателя [3].

В настоящей работе поставлены следующие задачи:

- выбор рациональной несущей системы и разработка проекта опытной магнитолевитационной тележки для перевозки стандартизированных контейнеров [4];

- анализ возможных нагрузок на магнитолевитационную тележку при использовании технологии магнитодинамической левитации «Inductrack»;

- расчет на прочность опытной конструкции тележки методом конечных элементов (МКЭ).

1. Выбор рациональной несущей системы и разработка конструкции опытной тележки

В результате конструктивных проработок компоновки тележки под известные геометрические параметры путевой структуры была разработана несущая система в виде Н-образной рамы (рис. 1), состоящей:

- из основной несущей балки прямоугольного сечения;
- продольных балок для маневровых колес и продольных балок для направляющих колес;
- кронштейнов для крепления блоков с магнитами.

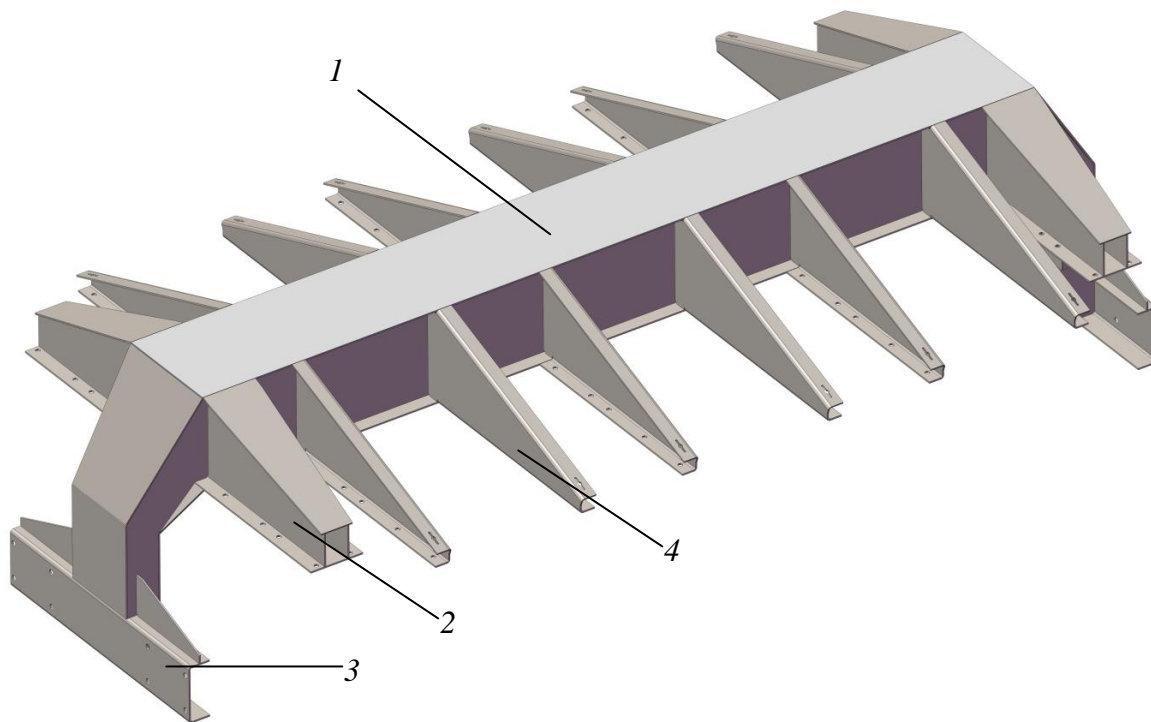


Рис. 1. Рама опытного образца магнитолевитационной тележки:

- 1 – основная несущая балка прямоугольного сечения;
- 2 – продольные балки для маневровых колес;
- 3 – продольные балки для направляющих колес;
- 4 – кронштейны для крепления блоков с магнитами

Конструкция тележки разработана с учетом возможности размещения массивных сверхпроводников взамен постоянных магнитов для использования технологии «МагТранСити» (сверхпроводниковая модификация технологии «Inductrack» [3]).

Основными элементами опытного образца тележки являются (рис. 2):

- несущая сварная стальная рама, к которой крепятся фитинговые упоры, блоки с магнитами, маневровые и направляющие колеса;
- магниты, объединенные в блоки по схеме «Массив Хальбаха» [5];
- маневровые колеса, необходимые для предварительного разгона тележки (при левитации колеса не касаются путевой структуры);
- направляющие колеса, которые служат для центрирования тележки при движении на участке разгона.

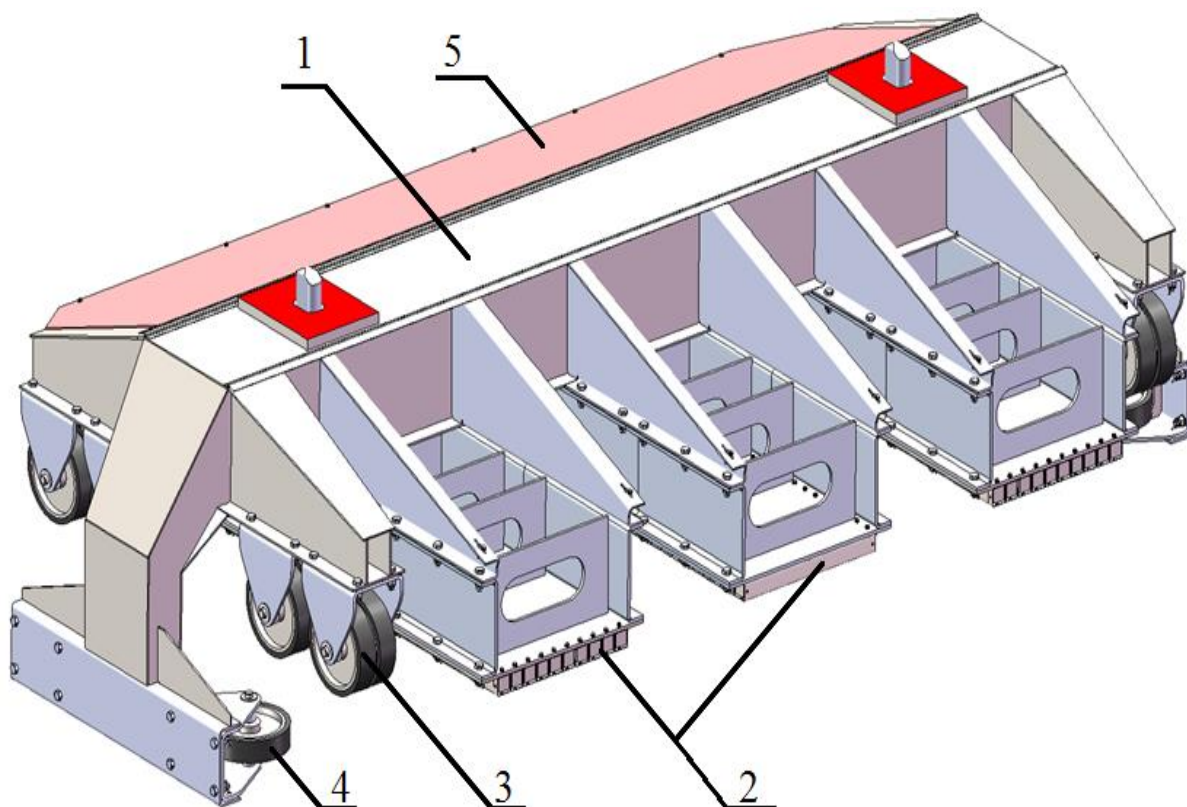


Рис. 2. Общий вид опытного образца магнитолевитационной тележки:

1 – рама; 2 – блоки с магнитами; 3 – маневровые колеса;
4 – направляющие колеса; 5 – защитный кожух

Геометрические характеристики поперечных сечений несущих элементов рамы оптимизированы по критерию наименьшей металлоемкости с использованием методов оптимального проектирования конструкций [6].

Для перевозки контейнеров с учетом наличия кривых участков в путевой структуре предложено конструктивное исполнение магнитолевитационной тележки (рис. 3), отличающееся от вышеописанной наличием поворотной опорной площадки. Опорная площадка представляет собой лист, на котором установлены фитинговые упоры, пятник и скользуны.

Передача вертикальных нагрузок от контейнера на раму тележки с поворотной опорой осуществляется через скользуны, передача поперечных и продольных нагрузок – через пятниковый узел.

Для предотвращения свободного вращения поворотной опоры в поперечном состоянии предусмотрены ограничители.

Основные параметры и размеры опытной магнитолевитационной тележки представлены в табл. 1.

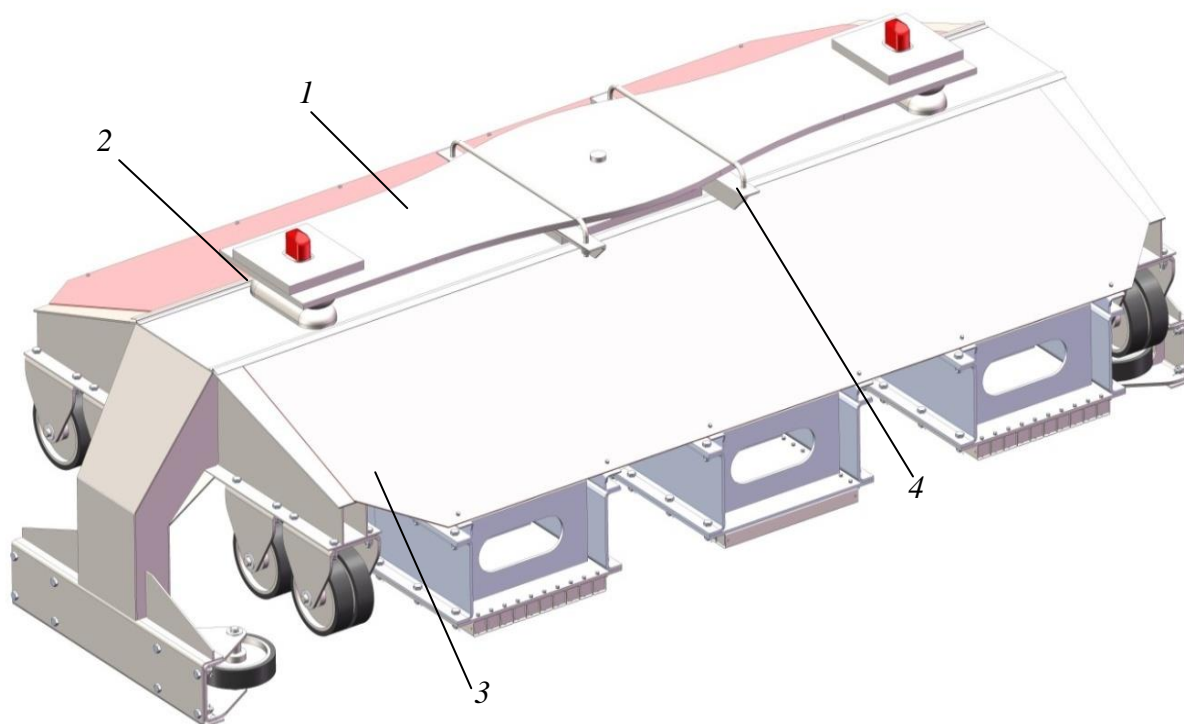


Рис. 3. Общий вид проекта магнитолевитационной тележки с поворотной площадкой:

1 – лист; 2 – фитинговый упор; 3 – скользяны; 4 – ограничитель

Таблица 1. Основные параметры и размеры опытной магнитолевитационной тележки

Наименование	Величина
Масса тары тележки, не более, кг	3000
Высота тележки от опорной поверхности для маневровых колес до опорной поверхности фитинговых упоров, мм:	
– тележка без поворотной опоры (рис. 2)	710
– тележка с поворотной опорой (рис. 3)	840
Длина тележки, мм	2000
Ширина тележки, не более, мм	3730

Основные элементы тележки выполнены из стали 09Г2С, элементы крепления магнитов выполнены из алюминия марки АМг5.

Тележки предназначены для перевозки контейнеров различных типов (рис. 4), при этом не требуется дополнительных устройств для соединения тележек между собой.

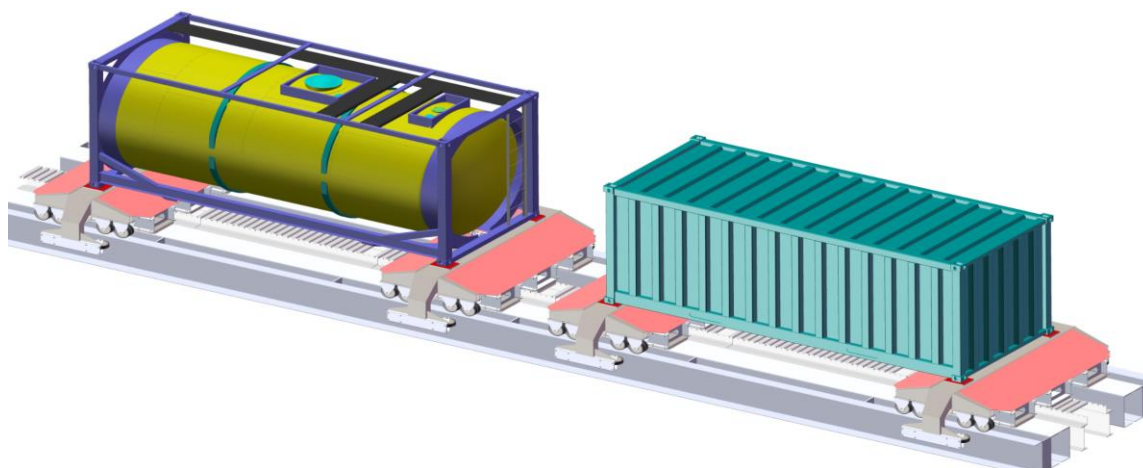


Рис. 4. Пример перевозки контейнеров на магнитолевитационных тележках

2. Анализ возможных нагрузок на магнитолевитационную тележку

В качестве расчетных режимов принимались:

- трогание тележки с места, когда включается линейный синхронный двигатель, тележка опирается на маневровые колеса и действуют инерционные нагрузки;
- торможение, когда тележка находится в состоянии магнитолевитационного полета, опирание на маневровые колеса отсутствует, действуют инерционные нагрузки;
- опирание тележки на магниты, когда тележка находится в состоянии магнитолевитационного полета;
- опирание тележки на маневровые колеса, при этом линейный синхронный двигатель выключен.

При расчете тележки на трогание с места и на торможение принималось следующее сочетание нагрузок:

- сила тяжести тележки;
- продольная сила инерции тележки;
- сила тяжести контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры;
- продольная сила инерции контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры;
- вертикальная динамическая добавка от действия продольной силы инерции контейнера с грузом.

Продольная сила инерции тележки определена путем умножения массы тележки на величину продольного ускорения. Величина продольного ускорения принималась равной $2g$. При расчете по МКЭ к тележке прикладывалось ускорение.

Продольная сила инерции контейнера составила $N_u = 0,67$ МПа и прикладывалась к двум фитинговым упорам.

Вертикальная динамическая добавка от действия продольной силы инерции контейнера P_z определялась по формуле «Норм...» [7]

$$P_z = N_u \cdot \frac{h_k}{2 \cdot l_k},$$

где N_u – продольная сила инерции контейнера с грузом, $N_u = 2 mg$;

h_k – высота контейнера;

l_k – длина контейнера.

При расчете тележки на вертикальное нагружение (при опирании на магниты или на маневровые колеса) принималось следующее сочетание нагрузок:

- сила тяжести тележки;
- сила тяжести контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры.

3. Расчет прочности магнитолевитационной тележки

Расчет производился по МКЭ с использованием расчетного пакета «Ansys Workbench», версия 12.1 [8, 9, 10]. Допускаемые напряжения принимались 0,9 от предела текучести $[\sigma]_T$, для стали 09Г2С $[\sigma]_T = 345$ МПа.

Для расчета была разработана объемная конечно-элементная модель тележки. Элементы расчетной модели имитировались объемными квадратичными конечными элементами с тремя степенями свободы в каждом узле. Общий вид конечно-элементной модели тележки представлен на рис. 5.

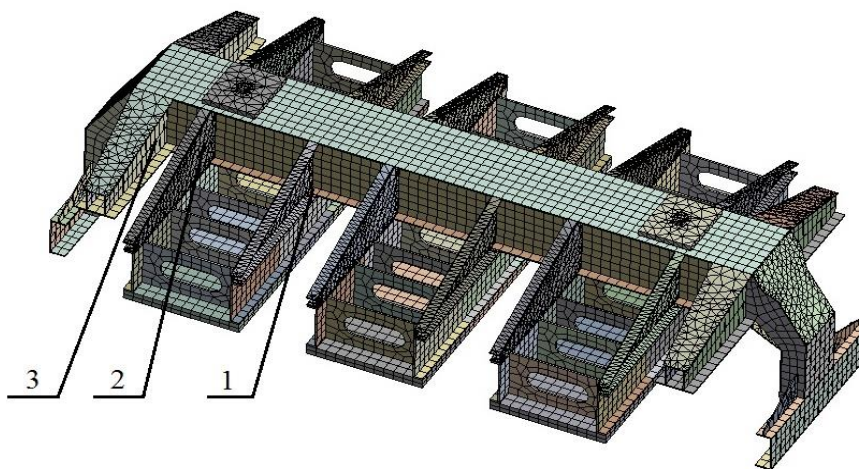


Рис. 5. Объемная конечно-элементная модель тележки с указанием точек замера эквивалентных напряжений

Расчетные режимы и максимальные эквивалентные напряжения в конструкции тележки представлены в табл. 2. Точки замера эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.

Расчетами установлено, что конструкция тележки способна выдержать удвоенную вертикальную нагрузку от контейнера массой брутто 34 тонны и продольные силы инерции, действующие от контейнера при продольном ускорении 2 g.

Таблица 2. Расчетные режимы и максимальные эквивалентные напряжения в конструкции тележки

Расчетный режим	Зона максимальных напряжений по рис. 5	Значение максимальных напряжений, МПа
Трогание тележки с места	Точка 1	246
Торможение	Точка 1	212
Опираие тележки на магниты	Точка 2	39
Опираие тележки на маневровые колеса	Точка 3	81

Заключение

1. Разработана конструкция опытного образца магнитолевитационной тележки, позволяющая устанавливать постоянные магниты при использовании технологии магнитодинамической левитации «Inductrack» или массивные сверхпроводниковые элементы при использовании технологии «МагТранСити».

2. Установлены основные режимы нагружения магнитолевитационной тележки для проведения прочностных расчетов.

3. Проведены расчеты на прочность методом конечных элементов по установленным режимам нагружения. По результатам расчетов конструкция тележки способна выдержать удвоенную вертикальную нагрузку от контейнера массой брутто 34 тонны и продольные силы инерции, действующие от контейнера при продольном ускорении 2 g.

Библиографический список

1. Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав : монография / В. А. Гапанович, В. Е. Андреев, Д. В. Пегов и др. ; под ред. В. А. Гапановича. – СПб. : Издательство ООО «Типография «НП-Принт», 2014. – 304 с.

2. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program. http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_LowSpeedMaglev_LessonsLearned.pdf. U.S. Department of Transportation (Federal Transit Administration). Low Speed Maglev Technology Development Program – Final Report, FTA-CA-26-7025-02.1, March 2002.

3. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Зайцев, А. А. Зайцев ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
4. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики (Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings): ISO 668:2013.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments and Methods. – V. 169, № 1. – P. 1–10.
6. Булычев М. А. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом: монография / М. А. Булычев, Д. Г. Бейн; под ред. В. П. Лозбинева. – Брянск : БГТУ, 2014. – 183 с.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 320 с.
8. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 640 с. – (Сер. «Проектирование»).
9. Tadeusz Stolarski. Engineering Analysis with ANSYS Software: Tadeusz Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Elsevier, 2010. – 480 pp.
10. Kent L. Lawrence. ANSYS Workbench Tutorial Release 11: Kent L. Lawrence. – Schroff Development Corporation, 20. – 236 pp.

References

1. Gapanovich V. A., Andreev V. E., Pegov D. V. *Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav* [High-speed rail rolling stock: monograph]. St. Petersburg, 2014. 304 p.
2. Department of Transportation (Federal Transit Administration). Low Speed Maglev Technology Development Program, Final Report, FTA-CA-26-7025-02.1, USA, 2002.
3. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation]. Moscow, 2014. 476 p.
4. ISO 668:2013. Series 1 freight containers: Classification, dimensions and ratings.
5. Halbach K. *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 169, no.1, pp. 1–10.
6. Bulychev M. A., Beyn D. G. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya kuzovov poluvagonov s nesushchim polom* [Mathematical modeling and optimization of the gondola body with weight-bearing floors]. Bryansk, 2014. 183 p.
7. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm [Standards for the calculation and design of cars of the Ministry of Railways of 1520 mm]. Moscow, 1996. 320 p.

8. Basov K. A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. User manual]. Moscow, 2014. 640 p.

9. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software* Elsevier, 2010. 480 p.

10. Lawrence Kent L. *ANSYS Workbench, Tutorial Release 11* Schroff Development Corporation, 2010. 236 p.

Сведения об авторах:

БЕЙН Дмитрий Григорьевич, к. т. н., заместитель начальника отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: dgbain@mail.ru

ИСПОЛОВА Екатерина Алексеевна, начальник отдела расчетов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: ispolova_ekaterina@pochta.ru

ЖИТКОВ Юрий Борисович, инженер-конструктор 2 категории отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: zhitkov-nvc@ya.ru

САХАРОВ Роман Александрович, инженер-конструктор отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: sakharok@mail.ru

Information about authors:

BEYN Dmitri Gr., Candidate of Technical Sciences, JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, Deputy Director, E-mail: dgbain@mail.ru

ISPOLOVA Ekaterina Al., JSC «Wagons», Design Bureau, Computation Department, Director, E-mail: ispolova_ekaterina@pochta.ru

ZHITKOV Yuri, JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, design engineer, E-mail: zhitkov-nvc@ya.ru

SAKHAROV Roman Al., JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, design engineer, E-mail: sakharok@mail.ru