

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

УДК [UDC] 629.463.12 + 06

DOI 10.17816/transsyst20239332-40

© О.А. Ворон, Ю.П. Булавин

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВА РЕФРИЖЕРАТОРНОГО ВАГОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГОХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цель:** исследовать изгибные колебания силовых конструкций кузова рефрижераторного вагона при различных вариантах расположения энергохолодильного оборудования.

**Материалы и методы:** задача решается методом конечных элементов, для анализа результатов используется коэффициент влияния.

**Результаты:** получены частоты и формы колебаний вариантов кузова вагона.

**Заключение:** частота колебаний мало меняется в зависимости от конструкции кузова и лежит в интервале 7–5 Гц, масса холодильной установки не оказывает значительного влияния на частоту колебаний, наибольшие перемещения приходится на крышу вагона, при определенной комбинации жесткости рессорного подвешивания и массы груза возможно возникновение резонансных явлений.

**Ключевые слова:** изгибные колебания, рефрижераторный вагон, оборудование, конечные элементы.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Railway rolling stock, train traction and electrification

© O.A. Voron, Y.P. Bulavin

Author Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

## MODAL-BASED ANALYSIS OF THE REFRIGERATED WAGON BODY WITH DIFFERENT PLACEMENTS OF ENERGY REFRIGERATION EQUIPMENT

**Aim:** modal analysis of the body of a refrigerated wagon with energy refrigeration equipment in various locations.

**Materials and Methods:** the problem was solved using the finite element method, and the participation factor was used to analyze the results.

**Results:** The frequencies and mode shapes of the refrigerated wagon body variants were determined.

**Conclusion:** The frequency of vibration changes little depending on the body design and lies in the range of 7-5 Hz. The mass of the refrigeration unit does not have a significant impact on the frequency of vibration. The largest displacements occur on the roof of the wagon. At a certain combination of the stiffness of the spring suspension and the mass of the load, resonant phenomena may occur.

**Key words:** mode shape, modal analysis, finite elements, refrigerator wagon, frequency.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] предлагается современный типаж изотермического подвижного состава (ИПС) с улучшенными технико-экономическими характеристиками и потребительскими качествами.

В техническом плане эти типы вагонов должны соответствовать требованиям инновационного подвижного состава, а именно, увеличенная вместимость, ускоренная погрузка-разгрузка, высокая весовая эффективность, увеличенная скорость движения, «умный» вагон». Для этого в их конструкции должны быть реализованы три важнейших технических решения:

- оптимизации геометрии несущих элементов конструкций кузова;
- ходовые части с осевой нагрузкой 22–23 т и скоростями движения до 140 км/ч;
- различные варианты расположения и типы специализированного энергоклиматического оборудования.

В эксплуатации такой подвижной состав предполагает следующие организационные мероприятия: перевозка «от двери до двери», локальный подвоз-развоз автомобильным транспортом, магистральная перевозка железнодорожным транспортом, движение по пассажирским ниткам графика, отправление по расписанию, использование поездов постоянного формирования.

В работе [1] были рассмотрены различные варианты расположения холодильно-нагревательных установок (ХНУ) в кузове вагона и реализуемые при них основные технико-экономические параметры. Лучшие показатели имеют те варианты, в которых ХНУ не занимают полезного объема, а значит и длины кузова, поэтому в данной работе рассмотрим наиболее перспективную модификацию конструкции кузова, в которой ХНУ располагаются посередине вагона на крыше. Такое расположение ХНУ позволяет упростить систему распределения и циркуляции термообработанного воздуха в грузовом помещении вагона.

В связи с тем, что расположение ХНУ на крыше изотермического вагона ранее не применялось, требуется его теоретическое обоснование в вопросах связанных с вибронатурженностью холодильного оборудования и кузова вагона. Следует отметить, что кузов вагона имеет довольно

жесткую раму и несмотря на свою длину, изгибные колебания обычно не рассматривают при размещении на ней ХНУ.

В работах [2–5] проводились теоретические и экспериментальные исследования изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов и вагонов электропоездов нового поколения, отмечаются сложности при определении низшей частоты изгибных колебаний кузова расчетными методами. Рассмотрены различные теоретические и экспериментальные аспекты влияния изгибной жесткости на ходовые динамические и эксплуатационные показатели вагонов.

Авторами [6–7] с помощью метода конечных элементов исследуются собственные изгибные колебания вагонов моторвагонного подвижного состава и уточняется формула для оценки их частоты.

В данной работе рассмотрим изгибные колебания двух вариантов кузова изотермического вагона с базовым расположением холодильного оборудования (Модель 1) и на крыше (Модель 2). Масса пустого кузова «Модель 1» – 10442 кг, «Модель 2» – 10301 кг. В расчетах примем, что масса вариантов ХНУ может составлять 400 и 700 кг, масса груза в кузове вагона 40 т.

В [8] указывается на необходимость уделять особое внимание ходовым частям ИПС, поэтому рассмотрим два случая, в первом вагон имеет упругие опоры в зонах пятников, которые моделируют рессорное подвешивание тележки, во втором без опор, что эквивалентно задаче колебаний стержня со свободными концами [9]. Конструкция кузова вагона и места расположения ХНУ показаны на Рис. 1.

В работе [9] представлен один из подходов решения поставленных задач, но в нашем случае с учетом имеющихся твердотельных моделей кузовов вагонов воспользуемся численными методами, а именно методом конечных элементов (МКЭ), и его программной реализацией в Ansys Mechanical.

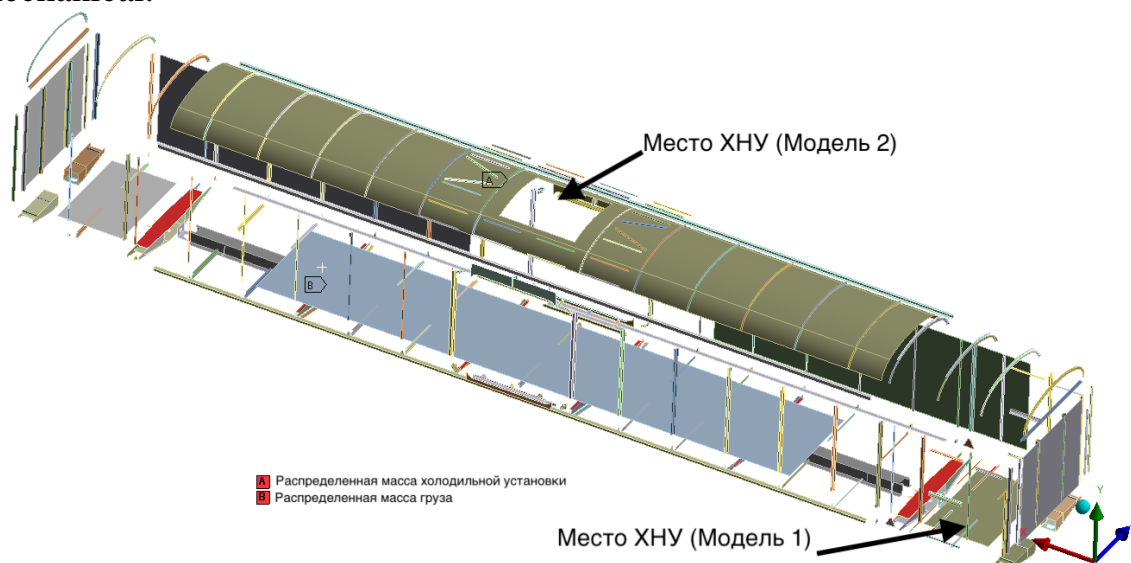


Рис. 1. Конструкция вагона и варианты размещения холодильного оборудования

## МЕТОДЫ

Задача об изгибных колебаниях кузова сводится к уравнению 1:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}, \quad (1)$$

где  $[M]$  – матрица масс;

$[K]$  – матрица жесткости;

$\{u\}$  – вектор обобщённых координат.

Решение (1) можно представить в виде

$$\{u\} = \{\phi_i\} \cos \omega_i t \quad (2)$$

где  $\omega_i$  – собственная частота колебаний или в герцах  $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$ ;

$\{\phi_i\}$  – собственный вектор, представляющий форму колебаний на частоте  $\omega_i$

$t$  – время.

После подстановки (2) в (1) получим:

$$\{\omega_i^2 [M] + [K]\} \{\phi_i\} = \{0\} \quad (3)$$

Для получения собственных частот колебаний требуется решить уравнение:

$$|[K] - \omega_i^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

После получения решения (4) из (3) находят собственный вектор или форму колебаний  $\{\phi_i\}$ .

Ввиду того что число степеней свободы исследуемых моделей велико, для оценки значимости формы колебаний и частоты воспользуемся коэффициентом влияния (Participation factor) [10], определение которого представлено ниже. Нормализуем  $\{\phi_i\}$  чтобы максимальное значение компонента стало равно единице.

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1$$

Тогда коэффициент влияния (Participation factor):

$$\gamma_i = \{\phi_i\}^T [M] \{D\}$$

где  $\{D\}$  – вектор, описывающий перемещения (возмущения);

$\{\phi_i\}$  – собственный вектор.

Перемещения можно описать следующим образом:

$$\{D\} = [T]\{e\},$$

где  $\{e\}$  – шесть возможных единичных векторов.

Матрица  $[T]$  имеет вид:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (Z - Z_0) & -(Y - Y_0) \\ 0 & 1 & 0 & -(Z - Z_0) & 0 & (X - X_0) \\ 0 & 0 & 1 & (Y - Y_0) & -(X - X_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $X, Y, Z$  – координаты точки на модели в глобальной системе координат;

$X_0, Y_0, Z_0$  – координаты точки вокруг которой происходит вращение в глобальной системе координат.

В итоге имеем:

$$\{D\} = [D_1^\alpha D_3^\alpha D_3^\alpha, \dots D_j^\alpha]^T,$$

где  $D_j^\alpha$  –  $j$ -тое возмущение в направлении  $\alpha$ .

В нашем случае интерпретация  $y_i$  следующая, чем больше значение, тем более значимее форма колебаний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате расчетов получено большое количество данных о частотах и формах колебаний, которые хорошо представляются графически в виде рисунков, приведем наиболее характерные формы колебаний, имеющих практический интерес.

Отнесем результаты для вагона без опор в первую группу, с опорами во вторую. Изгибные колебания первой группы базовой модели кузова показаны на Рис. 2, а с потолочным расположением ХНУ на Рис. 3.

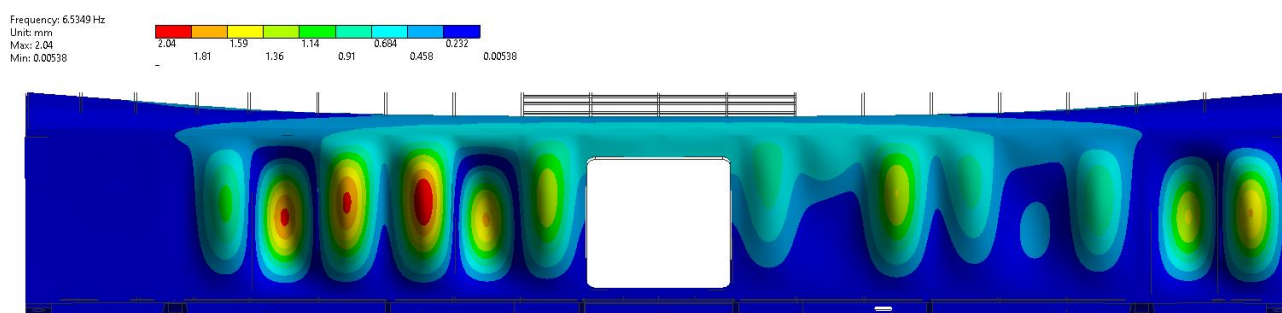


Рис. 2. Форма колебаний базовой модели кузова без опор



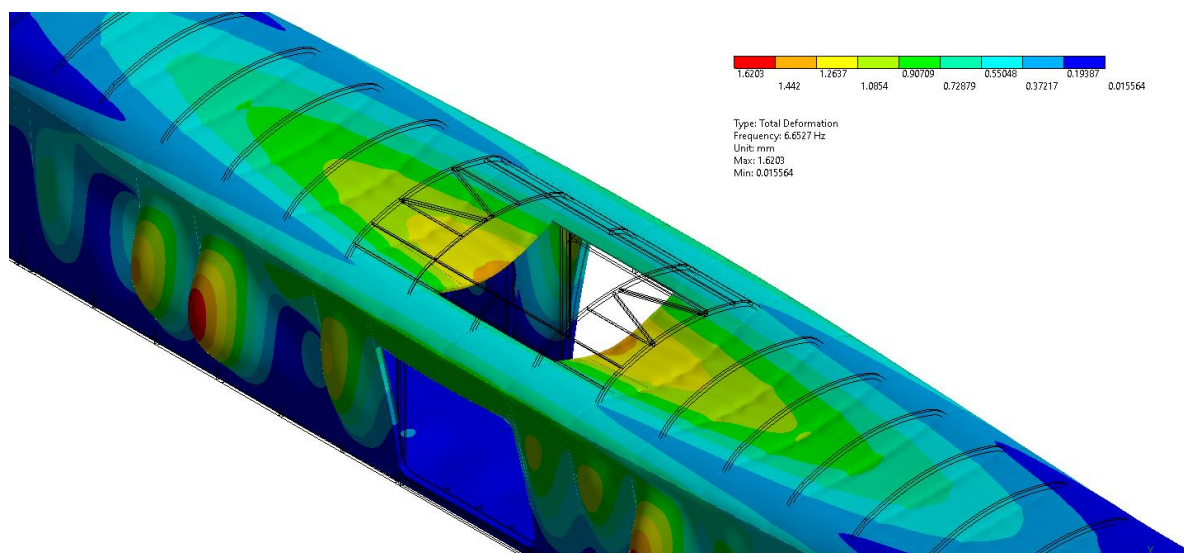


Рис. 3. Форма колебаний модели кузова без опор с потолочным расположением ХНУ

Колебания кузова на упругих опорах сложнее, но можно выделить два основных случая. В первом случае форма колебаний соответствует подпрыгиванию совместно с деформацией кузова, во втором деформация кузова происходит без подпрыгивания. Изгиб крыши и рамы вариантов кузова мало отличаются, поэтому на Рис. 4 и Рис. 5 показана модель с потолочным расположением ХНУ.

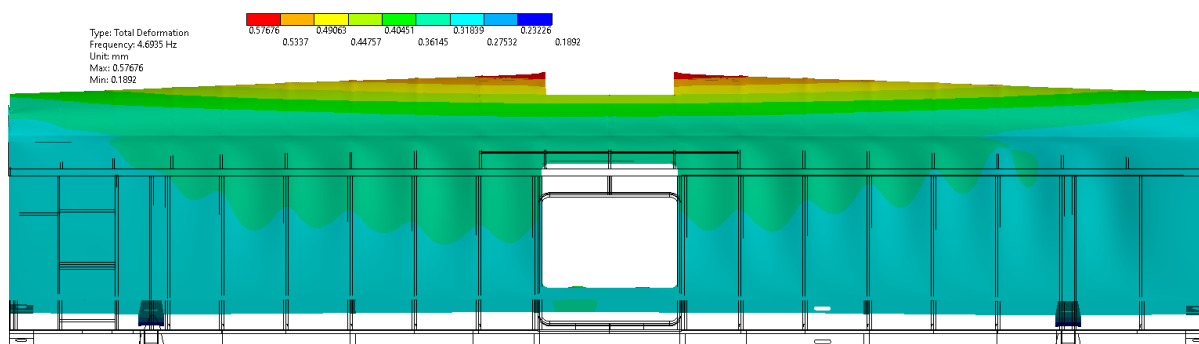


Рис. 4. Форма колебаний модели кузова на упругих опорах с потолочным расположением ХНУ (случай 1)

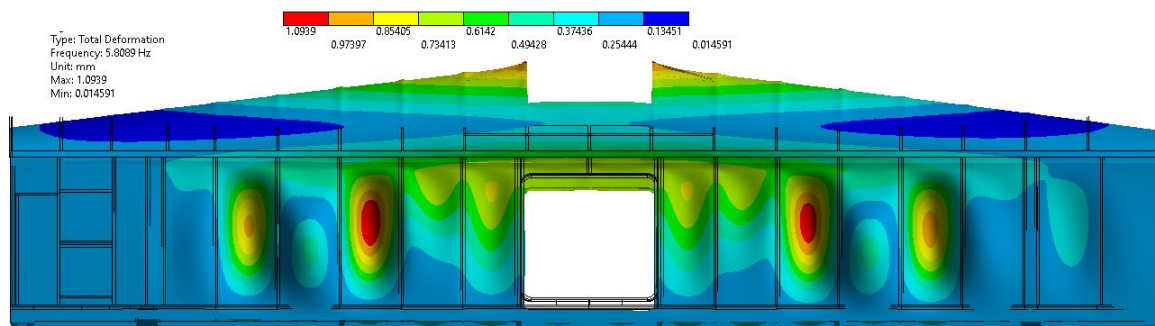


Рис. 5. Форма колебаний модели кузова на упругих опорах с потолочным расположением ХНУ (случай 2)

Полученные данные о частотах колебаний сведем в Табл.

Таблица. Частоты колебаний в зависимости от модели вагона и опирания

Условия моделирования	Вариант вагона				
	Модель 1, Гц	Модель 2, Гц	Модель 2, масса ХНУ 400 кг, Гц	Модель 2, масса ХНУ 700 кг, Гц	Модель 2, масса ХНУ 700 кг, вес груза 40 т, Гц
Упругие опоры (случай 1)	4,66	4,69	4,35	4,18	2,05
Упругие опоры (случай 2)	6,61	6,74	5,81	5,61	5,24
Без опор	6,53	6,65	5,45	5,11	5,24

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что частота колебаний мало меняется в зависимости от модели вагона и лежит в интервале 7–5 Гц, масса холодильной установки также не оказывает значительного влияния на частоту.

Анализ форм колебаний позволяет сделать вывод что наибольшие перемещения приходится на крышу вагона.

Частоты колебаний порожнего кузова для случаев 1 и 2 оказались близки и при определенной комбинации жесткости рессорного подвешивания и массы груза возможно возникновение резонансных явлений, поэтому необходимо проведение дополнительных исследований в этой области.

С учетом потребностей операторов изотермического подвижного состава в части вариативности температурных режимов внутри единого изотермического кузова в будущем предполагается рассмотрение варианта крышевого расположения, но с двумя погрузочными дверьми на каждой боковой стене кузова. Поэтому на основе полученных результатов выглядит целесообразным исследовать устойчивость конструкции крыши кузова вагона с крышевым расположением ХНУ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Ворон О.А. Особенности конструкции универсального кузова для инновационных изотермических вагонов // Вестник БГТУ. – 2021. – № 8. – С. 77–86. [Voron O.A. Peculiarities of universal body design for innovation refrigerator cars. *Bulletin of bryansk state technical university*. 2021;8(105):77-86. (In Russ.)]. doi: 10.30987/1999-8775-2021-8-77-86

2. Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Коршунов С.Д., Горин С.А. Анализ и оценка расчетно-экспериментального определения частоты изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 9. – С. 24–31. [Samoshkin SL, Korshunov SD, Gorin SA. Analysis and evaluation of experimental observation of railroad passenger car body's bending frequency. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2017;9:24-31. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 04.08.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30458500>
3. Скачков А.Н., Самошкин С.Л. Разработка и обоснование принципов метода экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов нового поколения // Вестник РГУПС. – 2018. – № 1. – С. 59–64. [Skachkov AN, Samoshkin SL. Development and principles justification of the experimental determination method of bending vibrations parameters for new generation passenger wagons. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018;1(69):59-64. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 04.08.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32711688>
4. Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Коршунов С.Д. и др. Разработка основополагающих принципов экспериментального метода определения изгибной жесткости кузовов цельнометаллических вагонов // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 10. – С. 32–37. [Skachkov AN, Samoshkin SL, Korshunov SD, et al. Development of the fundamental principles of the experimental method for determining the flexural rigidity of the all-steel car cabs. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2018;10:32-37 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36926409> Ссылка активна на: 04.08.2023.
5. Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Коршунов С.Д. и др. Определение параметров изгибных колебаний кузовов вагонов и оценка ходовых динамических и эксплуатационных показателей электропоездов нового поколения // Вестник РГУПС. – 2018. – № 4(72). – С. 78–87. [Skachkov AN, Samoshkin SL, Korshunov SD, et al. Determination of bending vibrational parameters of car bodies and assessment of running dynamic and operational indicators of a new generation electric train. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018;4(72);78-87 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36784709> Ссылка активна на: 04.08.2023.
6. Гучинский Р.В. Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2(42). – С. 4–11. [Guchinsky RV. Calculation of the frequency of natural bending vibrations of the body of an electric train car taking into account the flexibility of the supports. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2019;2(42):4-11. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2079-0392-2019-2-4-11. Ссылка активна на: 04.08.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39193375>
7. Гучинский Р.В., Петин С.В. Предварительный расчет частоты собственных изгибных колебаний кузовов вагонов электропоездов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2019. – № 2(46). – С. 50–57. [Guchinsky RV, Petinov SV. Preliminary calculation of the frequency of natural bending vibrations of bodies of electric train cars. *Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Problems: Rail- way Engineering*, 2019;2(46):50-57. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37576170>
8. Ворон О.А., Булавин Ю.П., Волков И.В. К вопросу выбора ходовых частей для перспективного изотермического подвижного состава // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4(72). – С. 63–70.



- [Voron OA, Bulavin YP, Volkov IV. To the question of the choice of running gears for perspective isothermal rolling stock. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018;4(72):63-70. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 04.08.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36784707>
9. Волков И.В., Булавин Ю.П. Динамическая модель деформируемого кузова рельсового экипажа // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1(65). – С. 47–54. [Volkov IV, Bulavin YP. Dynamic model of deformable body of railway vehicle. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018;4(72):47-54. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28862941> Ссылка активна на: 04.08.2023.
10. Clough RW, Penzien J. *Dynamics of Structures: Civil engineering series*. McGraw-Hill; 1993. 738 p. Available from: <https://books.google.ru/books?id=HxLakQEACAAJ>

**Сведения об авторах:**

**Ворон Олег Андреевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»;  
eLibrary SPIN: 7913-3421; ORCID: 0000-0003-1282-3832;  
E-mail: [rgups\\_voron@mail.ru](mailto:rgups_voron@mail.ru)

**Булавин Юрий Павлович**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 5233-0901; ORCID: 0000-0003-4557-6188;  
E-mail: [i@ibulavin.ru](mailto:i@ibulavin.ru)

**Information about the authors:**

**Oleg A. Voron**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief of the Department Car and car facilities;  
eLibrary SPIN: 7913-3421; ORCID: 0000-0003-1282-3832;  
E-mail: [rgups\\_voron@mail.ru](mailto:rgups_voron@mail.ru)

**Yuri P. Bulavin**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 5233-0901; ORCID: 0000-0003-4557-6188;  
E-mail: [i@ibulavin.ru](mailto:i@ibulavin.ru)

**Цитировать:**

Ворон О.А., Булавин Ю.П. Исследование изгибных колебаний силовых конструкций кузова рефрижераторного вагона при различных вариантах расположения энергохолодильного оборудования // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 3. – С. 32–40. doi: 10.17816/transsyst20239332-40

**To cite this article:**

Voron OA, Bulavin YP. Modal-based analysis of the refrigerated wagon body with different placements of energy refrigeration equipment. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(3):32-40. doi: 10.17816/transsyst20239332-40