

## УДК 629.4.0.18

А. В. ТРЕТЬЯКОВ<sup>1\*</sup>, О. А. ТРЕТЬЯКОВ<sup>2</sup>, М. В. ЗИМАКОВА<sup>3</sup>, А. А. ПЕТРОВ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский просп., 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (921) 938 34 93, эл. почта avtretiakov51@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4820-9535

<sup>2</sup>АО Научно-внедренческий центр «Вагоны», Московский просп., 2, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (921) 393 72 51, эл. почта ro\_pgk@mail.ru, ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>АО Научно-внедренческий центр «Вагоны», Московский просп., 2, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, эл. почта mazimm1987@hotmail.com, ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>ООО Научно-инновационный центр «Вагон-Тест», ул. Киевская, 32а, Санкт-Петербург, Россия, 196084, тел. +7 (931) 533 56 31, эл. почта gn.petrov.anton@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4802-6835

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРОВ УДАРНОГО ОТКЛИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** В научной работе необходимо проанализировать повышение эффективности традиционных методов проведения ударных испытаний наземных транспортных средств с целью оценки их прочности, надежности и долговечности. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторами статьи разработана методика проведения ударных испытаний и эффективный алгоритм, который базируется на идеях и методических предложениях, содержащихся в Руководстве ООН «Рекомендации по перевозкам опасных грузов». **Результаты.** С использованием современного языка программирования СИ-шарп был создан специализированный программный комплекс, реализующий алгоритм обработки данных ударных процессов, имеющий «дружественный» интерфейс с пользователем этого комплекса и другими программными продуктами вычислительной среды под управлением Windows. С применением данного комплекса была проведена обработка результатов испытаний контейнера-цистерны модели STL-26/0,4 типа UN T14 при различных режимах ударного нагружения (скоростей соударения), геометрических, инерционных и демпфирующих параметров этой конструкции. В результате получена объективная оценка исследуемых свойств испытанного объекта и сделан вывод о превышении расчетного спектра ударного отклика (СУО), его минимально допустимого значения во всем спектре исследуемых частот. **Научная новизна.** Впервые реализован комплексный теоретико-практический подход к изучению прочности, надежности и долговечности транспортных механических конструкций, подвергающихся ударным нагружениям на основе оценки спектров ударного отклика. **Практическая значимость.** Применение предлагаемой методики и разработанного программного комплекса для проведения ударных испытаний позволило повысить достоверность этих испытаний, сократить время их проведения и обработки результатов. Результаты обработки испытаний контейнера-цистерны показали, что это транспортное средство в полной мере обеспечивает требуемые нормативные показатели прочности, надежности и долговечности. Это подтверждается и тем, что после проведенных ударных испытаний в исследуемой конструкции отсутствовали конструктивные повреждения, остаточные деформации и не выявлены утечки перевозимых грузов. В статье делается вывод о возможности применения разработанной методики проведения ударных испытаний и реализующего ее программного комплекса при проведении аналогичных испытаний любых наземных транспортных средств.

**Ключевые слова:** ударные испытания; спектр ударного отклика; контейнер-цистерна; газовый контейнер; опасные грузы; прочность; надёжность; долговечность

### Введение

При испытаниях на устойчивость к ударным воздействиям железнодорожные транспортные средства подвергают ударным испытаниям с целью определения откликов исследуемых узлов и элементов конструкций. Согласно [1, 4, 7, 11,

12, 17, 18], образец каждого типа конструкции переносных цистерн и многоэлементных газовых контейнеров (МЭГК), отвечающих определению контейнера, приведённому в Международной конвенции по безопасным контейнерам 1972 года (КБК), должен быть подвергнут испытаниям на динамический удар в продольном направлении и должен удовлетворять требованиям

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

к испытаниям транспортных средств, перевозящих опасные грузы.

Одной из составных частей этой работы является обеспечение требований к кривым спектра ударного отклика (СУО), полученных в ходе испытаний для обоих угловых фитингов у контейнера подвергнутого удару с торца, которые должны повторять или превышать минимальную кривую СУО на всех частотах в диапазоне от 2 до 100 Гц [2, 3, 15, 19]. При этом результаты испытаний контейнера считаются удовлетворительными в том случае, если отсутствуют потери, остаточные деформации или повреждения, при которых контейнер становится непригодным для дальнейшего использования.

## Цель

Основная цель проведенных исследований – повышение эффективности традиционных методов проведения и обработки ударных испытаний [5, 6] подвижного состава железных дорог и других наземных транспортных средств. Она достигается путем разработки методики этих испытаний и ее программной реализации на современном языке программирования высокого уровня. На следующем этапе выполняется апробация результатов путем проведения ударных испытаний конкретного транспортного объекта и обработки данных этих испытаний с помощью комплекса программ.

## Методика

Расчёт спектра кривых ударного отклика основан на анализе временной реализации сигнала, поступающего от датчика ускорения по следующему алгоритму [3, 7, 8, 16].

Для каждого интервала частот для рассматриваемого частотного диапазона от 2 до 100 Гц, с шагом, как минимум, в 1/30 октавы:

а) рассчитывается матрица относительных перемещений с использованием всех точек данных из входного графика зависимости «ускорение – время» с помощью следующего выражения:

$$\xi_i = -\frac{\Delta t}{\omega_d} \sum_{k=0}^i \ddot{x}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \sin[\omega_d \Delta t (i-k)],$$

где  $\Delta t$  – временной интервал между значениями ускорения;

$\omega_n$  – собственная частота без затухания (в радианах);

$\omega_d$  – собственная частота с затуханием,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2};$$

$\ddot{x}_k$  –  $k$ -ое значение входных данных об ускорении;

$\zeta$  – декремент затухания;

$i$  – целое число, колеблющееся от 1 до числа входных точек данных об ускорении;

$k$  – параметр, используемый в суммировании, колеблющийся от 0 до текущего значения  $i$ ;

б) рассчитывается матрица относительных ускорений с использованием значений перемещения, полученных на этапе  $i$  с помощью следующего выражения:

$$\ddot{\xi}_i = 2\zeta \omega_n \Delta t \sum_{k=0}^i \ddot{x}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \cos[\omega_d \Delta t (i-k)];$$

в) фиксируется максимальное абсолютное значение ускорения из матрицы, полученной на этапе  $i$ , для рассматриваемого интервала частот. Это значение становится точкой кривой СУО для данного конкретного интервала частот. Этап  $i$  должен повторяться для каждой собственной частоты до тех пор, пока не будут оценены все интервалы собственных частот;

д) строится кривая спектра ударного отклика и минимальная СУО.

На первом этапе разработки программы расчёта СУО анализируются и устанавливаются требования к минимальному диапазону амплитуды ударного импульса и к частотному диапазону регистрируемых виброускорений.

Согласно п. 41.3.3.2 нормативного документа [12] минимальный диапазон амплитуды – 200 г, максимальный нижний предел частот – 1 Гц и минимальный верхний предел частот – 3 000 Гц, а аналого-цифровая система сбора данных должна обеспечивать минимальную частоту дискретизации регистрируемых процессов – 1 000 Гц. В систему сбора данных включается аналоговый фильтр нижних частот с частотой среза 200 Гц.

Всем этим требованиям отвечают датчики ускорений типа АЛЕ 049 и многоканальный измерительно-вычислительный комплекс МИС-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

036, розроблений фірмою НПП «МЕРА» [9, 13, 14].

Второй этап выполненной работы включал в себя выбор алгоритма языка программирования, позволяющего наиболее эффективно реализовать алгоритм обработки данных ударных процессов и имеющий «дружественный» интерфейс с общеупотребимыми программными продуктами вычислительной среды под управлением Windows.

На первый взгляд, наиболее подходящим для этих целей программным продуктом является WinПОС Expert НПП «МЕРА» [10], однако разработчики предпочли создать свой узкоспециализированный программный продукт, зафиксировав все необходимые параметры измерительно-регистрающей среды и настроенный на получение графической и текстовой входной и выходной информации, адаптированной к существующей нормативно-технической документации. В качестве алгоритмического языка программирования был выбран СИ-шарп (С#), и тем самым, помимо простоты и удобства использования программного продукта, была обеспечена его открытость и возможность адаптации к меняющимся требованиям по обработке данных ударных процессов.

На следующем этапе работы были сформированы типовые входные и выходные формы представления результатов расчётов ударных процессов и вычисления СУО контейнеров с построением минимальных СУО, что делает

анализ полученных результатов весьма наглядным и удобным.

На рис. 1 приведено диалоговое меню программы расчета СУО (в верхней части окна) и график зависимости «ускорение-время» (в нижней части окна).

В этом окне могут быть выполнены следующие действия:

а) открыт файл, содержащий запись исследуемого ударного процесса (напр. d40.dat);

б) выбран фрагмент записи (рис. 2), соответствующий нормативным требованиям – «Начало ударов» (до 0,05 с до удара) и «Окончание ударов» (2,0 с после удара);

с) выбран режим «Без фильтрации» или «С фильтрацией» (напр. 200 Гц);

д) выбран режим «Без масштабирования по массе» или «С масштабированием по массе», во втором случае требуемые массовые характеристики исследуемых объектов заносятся в появляющемся дополнительном окне;

е) указаны допустимые границы ускорений, которые приводятся на графике исходного процесса (напр. 4g);

ф) применены интуитивно понятные функциональные клавиши «мыши» ПЭВМ для масштабирования и оцифровки исходных графиков;

г) нажатие пункта меню «Перерисовать» приведет к появлению в нижней части экрана отредактированного изображения исходного графика ударного процесса;

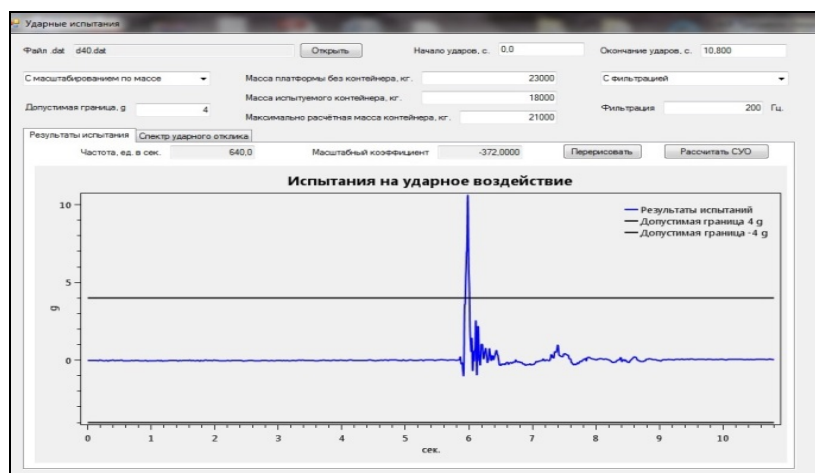


Рис. 1. Диалоговое меню программы расчета СУО и зависимость «ускорение-время» ударного отклика

Fig. 1. The dialog menu of the program for calculating shock response spectrum and the dependence "acceleration-time" of the shock response

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 2. Выделенный фрагмент записи ударного процесса на временном промежутке от 5,6 до 9,4 с

Fig. 2. Selection of the recording of the shock process in the time interval from 5.6 to 9.4 seconds

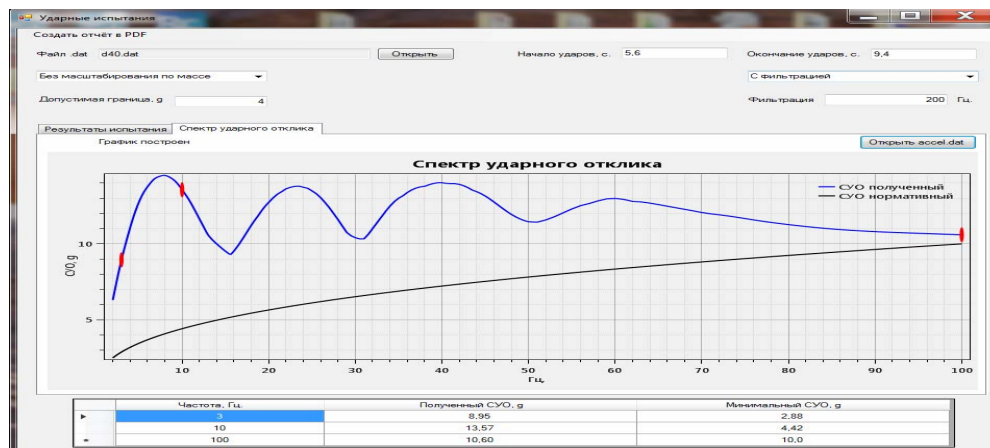


Рис. 3. Спектры ударного отклика:

1 – вычисленный, 2 – минимальный нормативный

Fig. 3. Shock response spectra:

1 – calculated, 2 – minimum regulatory

h) нажатие пункта меню «Расчет СУО» приведет к запуску программы обработки исходного процесса. Следует отметить, что в зависимости от быстродействия используемой для расчета ПЭВМ время расчета составляет от 2 до 3 минут для образцователей реализации продолжительностью 4 с. При этом на экране компьютера появляется затемненное окно, которое по-

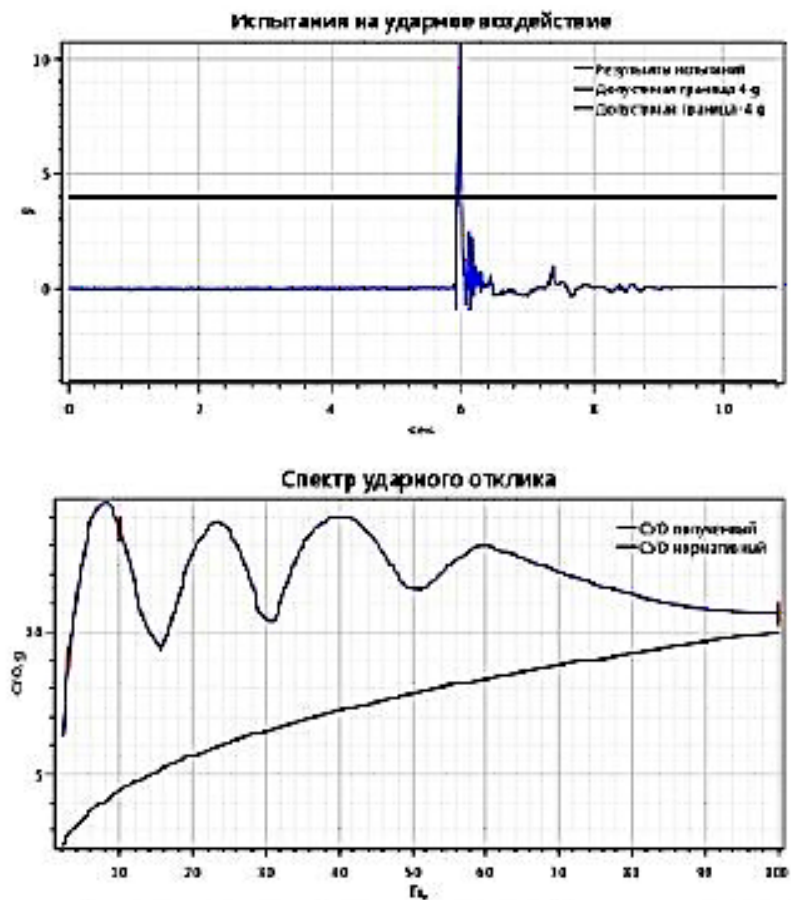
сле завершения расчета гаснет;

i) переключение окна «Результаты испытаний» на окно «Спектр ударного импульса» приводит к изображению, показанному на рис. 3;

j) сохранение отчетной формы выполненного ударного испытания (рис.4) возможно при нажатии иконки «Создать отчет в PDF».

Отчёт от 29.04.2015 14:58:08

исходный файл: 040.dat  
 Частота, ед. в сек : 640,0  
 Масштабный коэффициент: -372,0000  
 Без масштабирования по массе  
 С фильтрацией: 200 Гц  
 Допустимая граница: 4 g  
 начало ударов: 5,6 сек.                      окончание ударов: 9,4сек.



| Частота, Гц | Полученный СУО, g | Минимальный СУО, g |
|-------------|-------------------|--------------------|
| 3           | 8,99              | 2,88               |
| 10          | 13,59             | 4,42               |
| 100         | 10,62             | 10,0               |

Рис. 4. Отчетная форма по ударному испытанию

Fig. 4. Report form on shock test

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Имеющиеся на экране информационные сообщения «Частота, ед. с» и «Масштабный коэффициент» являются нередрактируемыми и отражают шаг дискретизации (напр. 640 Гц) и масштабный коэффициент (напр.  $-372,000$ ) исходного процесса.

**Результаты**

В апреле 2015 года в Испытательном центре

АО НВЦ «Вагоны» были проведены ударные испытания контейнера-цистерны (КЦ) модели CTL-26/0.4 типа UN T14 по методике [12], разработанной центром и утвержденной Российским Морским Регистром Судоходства 31.03.2015 г. Общий вид КЦ представлен на рис. 5.

Испытуемый КЦ имеет основные характеристики, приведенные в табл. 1.

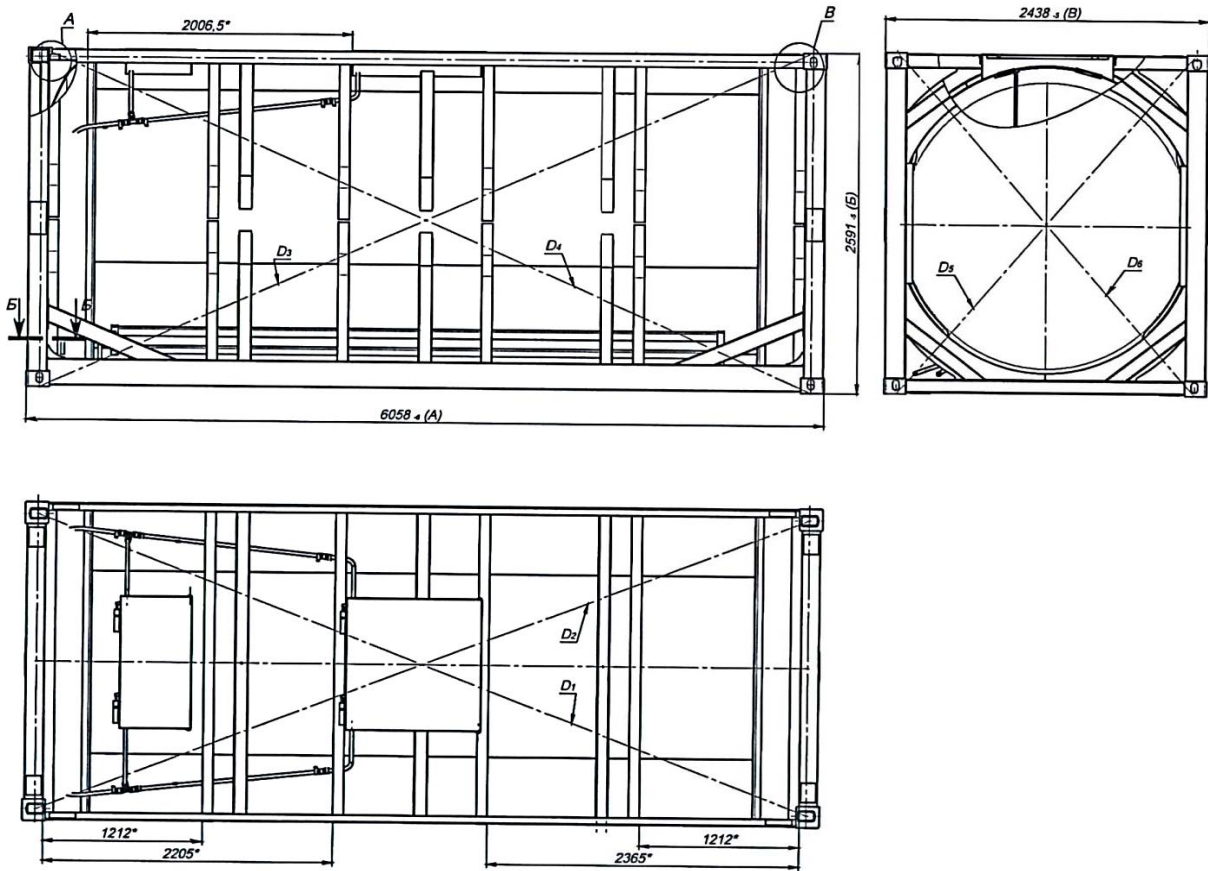


Рис. 5. Общий вид контейнера-цистерны модели CTL-26/0.4 типа UN T14

Fig. 5. General view of the tank-container, model CTL-26/0.4, UN T14 type

Таблица 1  
Основные характеристики КЦ модели  
CTL-26/0.4 типа UN T14

Table 1

The main characteristics of the tank-container, model CTL-26/0.4, UN T14 type

| N п/п | Технические характеристики              | Численные значения |
|-------|---|--------------------|
| 1     | Максимальная расчетная масса            | 36 000 кг          |
| 2     | Собственная масса (тара) при испытаниях | 4000 кг            |
| 3     | Максимальная грузоподъемность           | 32 000 кг          |
| 4     | Общая вместимость                       | 26 000 л           |
| 5     | Максимально допустимое рабочее давление | 0,4 МПа            |
| 6     | Испытательное давление                  | 0,6 МПа            |

В качестве бойка использовался вагонцистерна, загруженная водой до массы брутто 84 т.

При подготовке объекта к испытаниям испытуемый КЦ устанавливался на испытательную платформу для перевозки контейнеров (грузоподъемность 60 т, тара 22 т), оборудованную эластомерным поглощающим аппаратом энергоемкости 110 кДж класса Т1, в положение, смещенное в сторону вагона-бойка.

Наполнение КЦ производилось водой в объеме 25 220 л до 97 % вместимости (что соответствует массе брутто 29 220 кг), что ниже максимальной расчетной массы (36 000 кг).

Проводилась серия последовательных соударения, три из них с невысокими скоростями – соответственно 6,19; 6,42 и 7,10 км/ч и два – со скоростями 8,80 и 8,90 км/ч до достижения максимального ускорения и кривой спектра ударного отклика (СУО) не ниже минимальной на двух угловых фитингах, расположенных со стороны вагона-бойка. На рис.6 представлены осциллограммы ударов в автосцепку при скоростях соударения 6,19 и 8,90 км/ч.

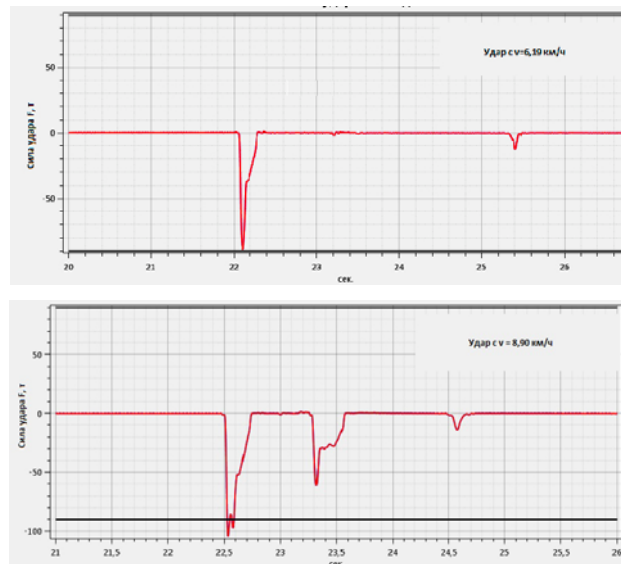


Рис. 6. Осциллограммы ударного воздействия F на автосцепку при разных скоростях соударения

Fig. 6. Oscillograms of the impact F on the coupler at different collision velocities

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

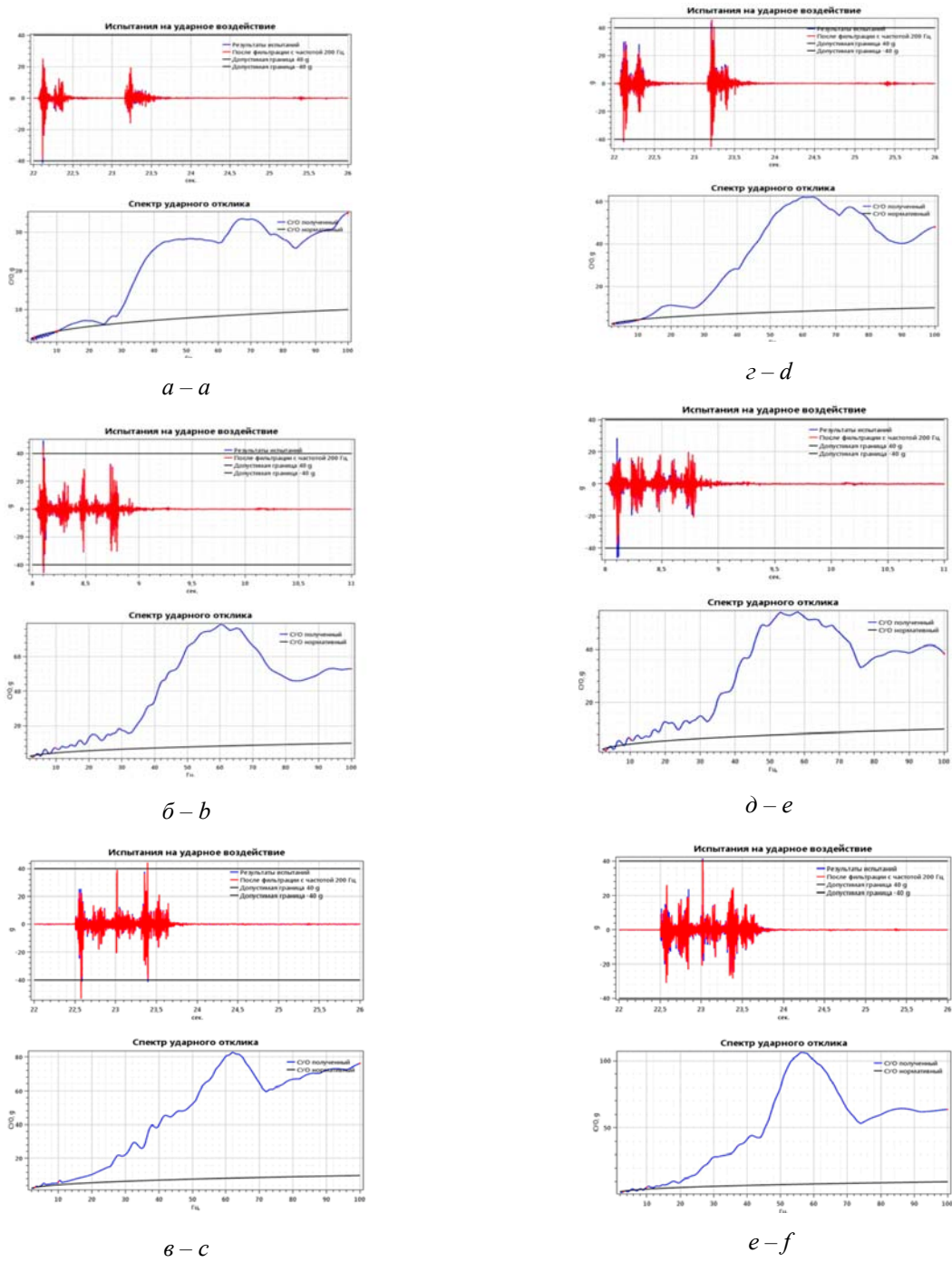


Рис. 7. Осцилограммы «ускорение-время» и спектры ударных откликов для:  
 – левых фитингов: *a*– для  $V = 6,19$  км/ч; *b* – для  $V = 7,10$  км/ч, *c* – для  $V = 8,90$  км/ч  
 – правых фитингов: *d* – для  $V = 6,19$  км/ч; *e* – для  $V = 7,10$  км/ч; *f* – для  $V = 8,90$  км/ч  
 Fig. 7. Oscillograms "acceleration-time" and spectra of shock responses for:  
 – left fittings: *a* – for  $V = 6.19$  km/h; *b* – for  $V = 7.10$  km/h, *c* – for  $V = 8.90$  km/h  
 – right fittings: *d* – for  $V = 6.19$  km/h; *e* – for  $V = 7.10$  km/h; *f* – for  $V = 8.90$  km/h



## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Ударные испытания обрабатывались программным комплексом, описанным выше, и были представлены в виде научно-технического отчета, содержащего отчетные формы – осциллограммы «ускорение – время» и спектры ударных откликов для фитингов, расположенных на двух сторонах со стороны вагона-бойка, рис. 7.

На рис. 8 приведены два фрагмента вычисленных СУО при скоростях соударения 6,19 и 8,90 км/ч соответственно в низкочастотной об-

ласти. Наглядно видно, что при скорости 6,19 км/ч вычисленный СУО в частотном диапазоне до 10 Гц имеет «провалы» ниже допускаемых минимальных значений СУО. При скоростях соударения 8,90 км/ч в этом же частотном диапазоне расчётные значения СУО превышают или совпадают с минимально допустимыми значениями спектра ударного отклика.

Результаты расчёта СУО для различных скоростей соударения и минимально допустимого СУО показаны в табл. 2

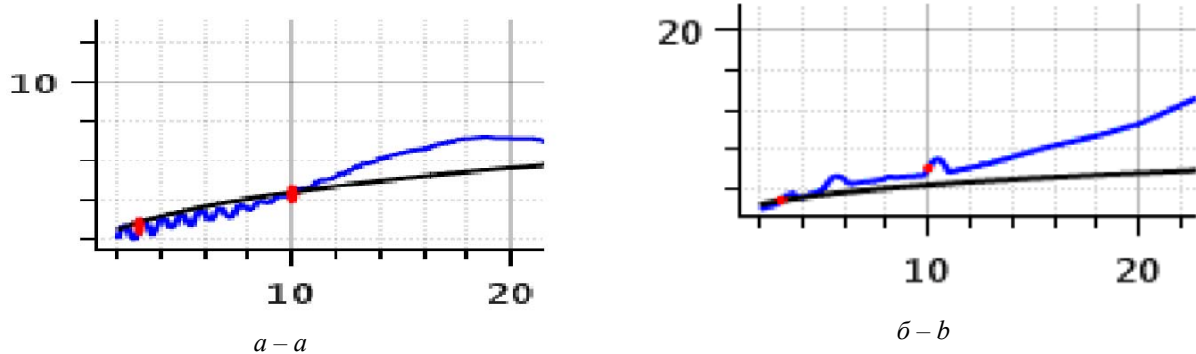


Рис. 8. Выделенные фрагменты расчётных и минимально допустимых СУО в низкочастотной области исследования при:

*a* – скорости соударения 6,19 км/ч,

*б* – скорости соударения 8,90 км/ч

Fig. 8. Selections of calculated and minimally admissible shock response spectra in the low-frequency region of the study with:

*a* – collision velocity 6.19 km/h,

*b* – collision velocity 8.90 km/h

Таблица 2

**Сравнение результатов расчёта СУО для различных скоростей соударения и минимально допустимого СУО**

Table 2

**Comparison of the results of the shock response spectra calculation for different collision rates and the minimum acceptable shock response spectrum**

| Частота, Гц | Скорость соударения V, км/ч |       |       | Минимальный СУО |
|-------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------|
|             | 6,19                        | 7,10  | 8,90  |                 |
|             | Левые фитинги               |       |       |                 |
| 3           | 2,68                        | 1,98  | 2,95  | 2,88            |
| 10          | 4,32                        | 7,05  | 6,16  | 4,42            |
| 100         | 35,00                       | 52,99 | 76,26 | 10,00           |

Окончание табл. 2

End of table 2

| Частота, Гц    | Скорость соударения V, км/ч |       |       | Минимальный СУО |
|----------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------|
|                | 6,19                        | 7,10  | 8,90  |                 |
| Правые фитинги |                             |       |       |                 |
| 3              | 2,57                        | 2,03  | 2,93  | 2,88            |
| 10             | 4,06                        | 6,39  | 5,90  | 4,42            |
| 100            | 48,09                       | 38,42 | 63,96 | 10,00           |

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна: предлагается новый подход к проведению ударных испытаний, в котором впервые реализован комплексный теоретико-практический подход к изучению прочности, надежности и долговечности транспортных механических конструкций, подвергающихся ударным нагрузениям, на основе оценки их спектров ударного отклика. Практическая значимость: Применение предлагаемой методики и разработанного программного комплекса для проведения ударных испытаний позволяет повысить достоверность этих испытаний, сократить время их проведения и обработки результатов.

### Выводы

Анализ этих результатов позволил сделать следующие выводы:

1. При сравнительно низких скоростях соударений (до 8,90 км/ч) вычисленные спектры

ударных откликов на низких частотах (до 10,0 Гц) имеют «провалы» относительно минимально допустимых значений СУО. По всей вероятности, это обусловлено использованием эластомерных поглощающих аппаратов, установленных на испытуемом вагоне – платформе.

2. При скоростях соударения выше указанного значения во всем спектре исследуемых частот наблюдается превышение минимально допустимых значений расчетного СУО.

3. После достижения при испытаниях расчетных уровней СУО, превышающих минимально допустимые значения этого параметра, констатировано отсутствие повреждений, остаточных деформаций и утечек жидкости у испытанных контейнеров – цистерн.

4. Выполненная работа позволяет сделать вывод о возможности применения методики оценки спектров ударного отклика и программного комплекса при проведении ударных испытаний любых наземных транспортных средств.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбрайер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбрайер, А. Ю. Роледер. – Санкт-Петербург : Изд-во политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
2. Бороненко, Ю. П. Динамические испытания контейнеров при продольных соударениях / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, А. Н. Смирнов // Опасные грузы и контейнеры. – 2004. – № 1/2. – С. 6–11.
3. Бороненко, Ю. П. Динамические испытания на продольные соударения контейнеров и вагонов для их перевозки / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, А. Н. Смирнов // Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ–70 : тез. докл. Междунар. конф. (25.09–26.09.2012). – Москва, 2012. – С. 71.
4. Вибрационные и ударные испытания космических и научных приборов / Т. М. Томила, А. С. Гребенников, М. М. Лактионова, Б. Н. Бахтин // Сб. тр. XXVII сес. Рос. акуст. о-ва (РАО). – Санкт-Петербург, 2014. – С. 2–7.
5. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.
6. ГОСТ 8.127-74. Измерения параметров ударного движения. – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – 14 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.
8. Канунникова, Е. А. Формирование ударных импульсов по заданным спектрам ответа для испытаний оборудования / Е. А. Канунникова, Н. А. Красова, И. А. Мещихин // Вопросы электромеханики : тр. ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 130, № 5. – С. 33–38.
9. Комплексы измерительно-вычислительные : рук. по эксплуат. НПП «Мера». – Мытищи, 2017. – 24 с.
10. Пакет Обработки Сигналов WinПОС. Руководство пользователя. Ред. 3.2. / НПП «Мера». – Мытищи, 2014. – С. 31–42.
11. Повышение прочности ресурса и безопасности эксплуатации несущих конструкций железнодорожного подвижного состава / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков // Проблемы механики ж.-д. транспорта: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава и энергосбережение : тез. докл. XII междунар. конф. – Днепропетровск, 2008. – С. 104.
12. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Руководство ООН по испытаниям и критериям. – Нью-Йорк ; Женева : United Nations, 2009. – Ч. 4 : Методы испытаний транспортного оборудования. – С. 409–416.
13. Современные стенды для всех видов испытаний // Автоматизация испытательных стендов в авиационной отрасли промышленности : сб. ст. НПП «Мера». – Мытищи, 2017. – С. 2–9.
14. Средства измерения и анализа параметров динамических процессов : [каталог НПП «Мера»]. – Мытищи, 2016–2017. – 40 с.
15. Субботин, С. Г. Спектральные характеристики для сравнения и идентификации ударных нагрузений / С. Г. Субботин, А. Ю. Мельников // Диагностика материалов. – 2009. – № 12, т. 75. – С. 53.
16. Томилина, Т. М. Ударные испытания космического оборудования по заданному спектру отклика / Т. М. Томилина, А. С. Гребенников // Сес. науч. совета РАН по акустике и XXIV сес. РАО : сб. тр. конф. – Москва, 2011. – С. 8–10.
17. Harris, C. M. Shock and Vibration Handbook / C. M. Harris, A. G. Pirsal. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 568 p.
18. Lee, J.-R. Review of Pyrosheck wave measurement and simulation for space systems / J.-R. Lee, C. C. Chia, C.-W. Kong // Measurement. – 2012. – Vol. 45. – P. 631–642. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.011.
19. Smallwood, D. An improved Recursive Formula For Calculating Shock Response Spectra [Электронный ресурс] / D. Smallwood // The Shock And Vibration Bulletin. – 1981. – No. 51, pt. 2. – Режим доступа: [http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001\\_NL.pdf](http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001_NL.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 07.04.2017.

О. В. ТРЕТЬЯКОВ<sup>1\*</sup>, О. О. ТРЕТЬЯКОВ<sup>2</sup>, М. В. ЗИМАКОВА<sup>3</sup>, А. А. ПЕТРОВ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны та вагонне господарство», Петербургський державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Московський просп., 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (921) 938 34 93, ел. пошта [avtretiakov51@yandex.ru](mailto:avtretiakov51@yandex.ru), ORCID 0000-0003-4820-9535

<sup>2</sup>АТ Науково-впроваджувальний центр «Вагоны», Московський просп., 2, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (921) 393 72 51, ел. пошта [ro\\_pgk@mail.ru](mailto:ro_pgk@mail.ru), ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>АТ Науково-впроваджувальний центр «Вагоны», Московський просп., 2, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, ел. пошта [mazimm1987@hotmail.com](mailto:mazimm1987@hotmail.com), ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>ТОВ Науково-інноваційний центр «Вагон-Тест», вул. Київська, 32а, Санкт-Петербург, Росія, 196084, тел. +7 (931) 533 56 31, ел. пошта [gn.petrov.anton@yandex.ru](mailto:gn.petrov.anton@yandex.ru), ORCID 0000-0003-4802-6835

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА СПЕКТРІВ УДАРНОГО ВІДГУКУ РУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** У науковій роботі необхідно проаналізувати підвищення ефективності традиційних методів проведення ударних випробувань наземних транспортних засобів із метою оцінки їх міцності, надійності та довговічності. **Методика.** Для досягнення поставленої мети авторами статті розроблена методика проведення ударних випробувань та ефективний алгоритм, який базується на ідеях та методичних пропозиціях, що містяться в Керівництві ООН «Рекомендації з перевезення небезпечних вантажів». **Результати.** З використанням сучасної мови програмування СІ-шарп був створений спеціалізований програмний комплекс, який реалізує алгоритм обробки даних ударних процесів, що має «дружній» інтерфейс із користувачем цього комплексу та іншими програмними продуктами обчислювального середовища під керу-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ванням Windows. Із застосуванням даного комплексу була проведена обробка результатів випробувань контейнера-цистерни моделі CTL-26/0,4 типу UN T14 при різних режимах ударного навантаження (швидкостей зіткнення), геометричних, інерційних та демпфуючих параметрів цієї конструкції. В результаті отримана об'єктивна оцінка досліджуваних властивостей випробуваного об'єкта та зроблено висновок про перевищення розрахункового спектра ударного відгуку (СУВ), його мінімально допустимого значення у всьому спектрі досліджуваних частот. **Наукова новизна.** Вперше реалізовано комплексний теоретико-практичний підхід до вивчення міцності, надійності та довговічності транспортних механічних конструкцій, що піддаються ударним навантаженням на основі оцінки спектрів ударного відгуку. **Практична значимість.** Застосування запропонованої методики та розробленого програмного комплексу для проведення ударних випробувань дозволило підвищити достовірність цих випробувань, скоротити час їх проведення та обробки результатів. Результати обробки випробувань контейнера-цистерни показали, що цей транспортний засіб у повній мірі забезпечує необхідні нормативні показники міцності, надійності та довговічності. Це підтверджується й тим, що після проведених ударних випробувань у досліджуваній конструкції були відсутні конструктивні пошкодження, залишкові деформації та не виявлені витoki перевезених вантажів. У статті робиться висновок про можливість застосування розробленої методики проведення ударних випробувань та програмного комплексу, що її реалізує, при проведенні аналогічних випробувань будь-яких наземних транспортних засобів.

*Ключові слова:* ударні випробування; спектр ударного відгуку; контейнер-цистерна; газовий контейнер; небезпечні вантажі; міцність; надійність; довговічність

A. V. TRETIAKOV<sup>1\*</sup>, O. A. TRETIAKOV, M. V. ZIMAKOVA, A. A. PETROV

<sup>1\*</sup>Dep. «Car and Cars Facilities», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Moskovskiy Av., 9, Russia, 190031, tel. +7 (921) 938 34 93, e-mail avtretiakov51@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4820-9535<sup>2</sup>JSC

<sup>2</sup>JSC Scientific and Innovation Center «Cars», Moscovskiy Av., 2, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (921) 393 72 51, e-mail po\_pgk@mail.ru, ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>JSC Scientific and Innovation Center «Cars», Moscovskiy Av., 2, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 310 95 00, e-mail mazimm1987@hotmail.com, ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>LLC Scientific and Innovation Center «Car-Test», Kievskaya St., 32a, Saint-Petersburg, Russia, 196084, tel. +7 (931) 533 56 31, e-mail gn.petrov.anton@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4802-6835

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF SHOCK SPECTRUM RESPONSE OF ROLLING STOCK

**Purpose.** The article is aimed to analyze the increase in the effectiveness of traditional methods for carrying out shock tests of land vehicles, in order to assess their strength, reliability and durability. **Methodology.** To achieve this purpose, the authors of the article developed a technique for conducting impact tests and effective algorithm based on the ideas and methodological proposals contained in the UN Guidelines on the “Recommendations for Transportations of Dangerous Goods”. **Findings.** With the use of the modern programming language SI-Sharp, a specialized software package was created that implements the algorithm for handling shock processes, which has a "friendly" interface with the user of this complex and other software products of the computing environment powered by Windows. With the application of this complex, the results of tests of the tank-container of the model CTL-26/0.4, type UN T14 under different shock loading (collision rates), geometric, inertial and damping parameters of this design were processed. As a result, an objective evaluation of the properties of the tested object was obtained, and a conclusion was made that the calculated shock response spectrum (SRS) was exceeded, its minimum permissible value in the entire spectrum of the investigated frequencies. **Originality.** For the first time, a complex theoretical and practical approach to the study of the strength, reliability, and durability of transport mechanical structures subjected to impact loads on the basis of the evaluation of the impact response spectra was realized. **Practical value.** The application of the proposed methodology and the developed software package for carrying out shock tests made it possible to increase the reliability of these tests, to shorten the time of their testing and to process the results. The results of the testing of the tank-container tests showed that this vehicle fully provides the required normative parameters of strength, reliability and durability. This is also confirmed by the fact that after the shock tests carried out in the structure under investigation there were no structural damages, residual deformations and no leakage of the goods transported. The article concludes that it is possible to use the developed technique for carrying out shock tests and implementing a software package for carrying out similar tests of any land vehicles.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*Keywords:* shock tests; shock response spectrum; container-tank; gas container; dangerous goods; strength; reliability; durability

## REFERENCES

1. Birbraer, A. N., & Roleder, A. J. (2009). *Extreme actions on structures*. Saint Petersburg: Publishing House of the Politechnical University.
2. Boronenko, Y. P., Orlova, A. M., & Smirnov, A. N. (2004). Dinamicheskiye ispytaniya konteynerov pri prodolnykh soudareniyakh. *Dangerous Goods & Containers*, 1/2, 6-11.
3. Boronenko, Y. P., Orlova, A. M., & Smirnov, A. N. (2012). Dinamicheskiye ispytaniya na prodolnyye soudareniya konteynerov i vagonov dlya ikh perevozki. *Proceedings of the International Conference on Experimentalnoe koltso VNIIZhT-70, September 25-26, 2012*, 71. Moscow: JSC «VNIIZhT».
4. Tomilina, T. M., Grebennikov, A. S., Laktionova, M. M., & Bakhtin, B. N. (2014). Vibro and shock verification tests of space instruments. *Abstracts of papers presented at XXVII session of Russian Acoustical Society, April 16-18, 2014, Saint Petersburg*. Saint Petersburg: Russian Acoustical Society. Retrieved from <http://rao.akin.ru/Rao/sess27/%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0.pdf>
5. Freight and Passenger Railcars. methods of testing structural strength and dynamic performance, GOST 33788-2016 (2016).
6. Shock-motion parameter measurements. Terms and definitions, GOST 8.127-74 (1974).
7. Batuev, G. S., Golubkov, Y. V., Yefremov, A. K., & Fedosov, A. A. (1977). *Inzhenernyye metody issledovaniya udarnykh protsessov*. Moscow: Mashinostroenie.
8. Kanunnikova, E. A., Krasova, N. A., & Meshchikhin, I. A. (2012). Impact pulses generation as per preset response spectra for equipment testing. *Electromechanical matters. VNIEM studies*, 130(5), 33-38.
9. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). *Kompleksy izmeritelno-vychislitelnye* [manual]. Mytishi: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
10. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2014). Paket Obrabotki Signalov WinPOS (Version 3.2) [user guide]. (pp. 31-42). Mytishi: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
11. Makhutov, N. A., Kossov, V. S., Oganyan, E. S., & Krasnyukov, N. F. (2008). Povysheniye prochnosti resursa i bezopasnosti ekspluatatsii nesushchikh konstruktсий zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. *Abstracts of papers presented at 12th International Conference Problems of the Railway Transport Mechanics: Safety of Motion, Dynamics, Strength of Rolling Stock and Energy Saving, May 28-30, 2008, Dnipropetrovsk*, 104. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
12. United Nations. (2009). *Rekomendatsii po perevozke opasnykh gruzov. Rukovodstvo OON po ispytaniyam i kriteriyam ST/SG/AC.10/11/Rev.5* (pp. 409-416). New York; Geneva: United Nations.
13. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). Sovremennyye stendy dlya vsekh vidov ispytaniy. In *Avtomatizatsiya ispytatelnykh stendov v aviatsionnoy otrasli promyshlennosti* (pp. 2-9). Retrieved from <http://www.nppmera.ru/assets/files/documentation/Avia-2016-2017.pdf>
14. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). *Sredstva izmereniya i analiza parametrov dinamicheskikh protsessov* [catalog]. Mytishi: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
15. Subbotin, S. G., & Melnikov, A. Y. (2009). Spektralnyye kharakteristiki dlya sravneniya i identifikatsii udarnykh nagruzheniy. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 75(12), 53-56.
16. Tomilina, T. M., & Grebennikov, A. S. (2011). Udarnyye ispytaniya kosmicheskogo oborudovaniya po zadanomu spektru otklika. *Proceedings of the XXIV session of Russian Acoustical Society* (pp. 8-10). Moscow: Russian Acoustical Society.
17. Harris, C. M., & Pirsal, A. G. (2002). *Shock and Vibration Handbook*. New York: McGraw-Hill.
18. Lee, J.-R., Chia, C. C., & Kong, C.-W. (2012). Reviw of Pyrosheck wave measurement and simulation for space systems. *Measurement*, 45(4), 631-642. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.011
19. Smallwood, D. (1981). An improved Recursive Formula for Calculating Shock Response Spectra. *The Shock and Vibration Bulletin*, 51(2). Retrieved from [http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001\\_NL.pdf](http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001_NL.pdf)

*Статья рекомендована к публикации научным комитетом XIV Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение»*

Поступила в редколлегию: 30.05.2016

Принята к печати: 01.03.2017