

УДК 629.463.32

В.В. ГАЛОВ, С.Б. КОМИССАРОВ, Р.В. ГРАБОРОВ, Р.И. ШЕЙЧЕНКО, М.А. ЧУБАНЬ

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ РАСПЛАВЛЕННОЙ СЕРЫ МОДЕЛИ 15-9544

В статье описаны конструкторские решения, реализованные в перспективном вагоне-цистерне модели 15-9544, а также функциональные испытания опытного образца данного вагона. По результатам испытаний сделано заключение, что устройства загрузки-разгрузки, системы теплоизоляции и электронагрева соответствуют требованиям технического задания, а примененные в ходе проектирования вагона разработки дали положительный эффект.

Ключевые слова: вагон-цистерна, расплавленная сера, серная кислота, функциональные испытания, системы теплоизоляции и электронагрева

У статті описані конструкторські рішення, реалізовані в перспективному вагоні-цистерні моделі 15-9544, а також функціональні випробування дослідного зразка даного вагона. За результатами випробувань зроблено висновок, що пристрої завантаження-розвантаження, системи теплоізоляції та електрообігріву відповідають вимогам технічного завдання, а застосовані в ході проектування вагона розробки дали позитивний ефект.

Ключові слова: вагон-цистерна, розплавлена сірка, сірчана кислота, функціональні випробування, системи теплоізоляції та електрообігріву

The article contains analysis of the experience and the results of the test center of rail car-building products. It describes design solutions, implemented to construction of the prospective tank car model 15-9544, and functional testing of its prototype. In particular, the main structural difference of experimental rail car sample related to functional testing, compared to similar type of car is an annular gap between the wall of the boiler casing and the shell in the upper part of the rail car. An insulation made of thin basalt fiber is used as well. Insulation casing with bottom parts made of composite materials and heating system is equipped with heat screens. In the upper part of the rail car insulation layer of the car is increased by 15%. Loading and unloading devices of the test rail car also have features. As concerns the results of the functional test, impairments of structural elements of the rail-car and loading and unloading terminals haven't been identified. Loading and unloading devices, systems and insulation electro-warming are functional and confirm performance declared in the technical documentation. Thus, according to the results of functional tests, the loading and unloading devices, insulation and electro-warming systems meet the technical specifications. Furthermore the modifications the rail car had distinctive positive effect.

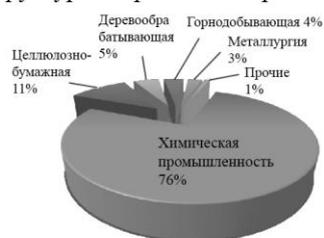
Keywords: tank car, molten sulfur, sulfuric acid, functional tests, insulation and electro-warming systems

Введение

В связи с развитием агропромышленного комплекса [1] стран СНГ, в т. ч. России, в настоящее время продолжает увеличиваться темп потребления серы предприятиями химической промышленности. Например, за последние 5-7 лет отмечен устойчивый

рост потребления серы предприятиями химической промышленности, являющимися производителями минеральных удобрений (рис. 1). Увеличение потребления серы приводит к возрастанию объемов её производства и, соответственно, перевозок, в т. ч. железнодорожным транспортом.

Структура потребления серы по отраслям



Ключевые потребители серы в России

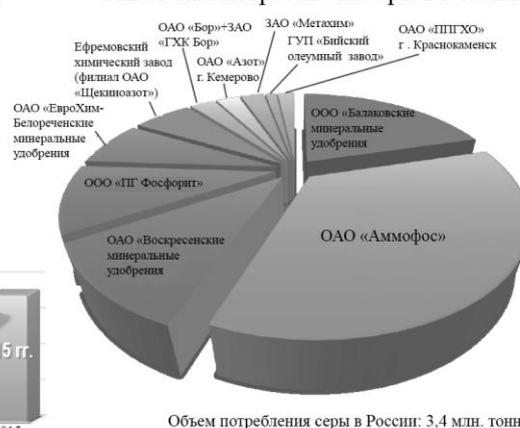


Рис. 1 – Роль серы в различных отраслях промышленности России [2]

Для перевозки расплавленной серы железнодорожным транспортом используются четырехосные вагоны-цистерны моделей 15-1480, 15-1482 (-02, -05, -06) производства ОАО "МЗТМ" (г. Мариуполь, Укра-

ина) [3]. К настоящему времени эксплуатационный парк таких вагонов-цистерн сильно изношен и требует обновления. Из парка эксплуатируемых вагонов-

© Галов В.В., С.Б. Комиссаров, Граборов Р.В., Шейченко Р.И., Чубань М.А., 2016

цистерн ежегодно списывается более 100 единиц. Пик списания ожидается в 2019 г., после чего перевозка жидкой серы по железной дороге будет сведена к минимуму без принятия срочных мер по восполнению численности парка вагонов-цистерн.

Для решения проблемы восполнения парка вагонов-цистерн управляющей компанией "РэйлТрансХолдинг" (далее – УК "РТХ", Москва) был разработан перспективный вагон-цистерна для перевозки расплавленной серы модели 15-9544 с осевой нагрузкой 25 тс и назначенным сроком службы 32 года, отвечающий критериям, предъявляемым к инновационным вагонам нового поколения.

Постановка задачи

Опытные образцы вагона были изготовлены на ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод" (далее – ОАО "НМЗ", Новозыбков, Брянская обл.), успешно прошли комплекс предварительных и приемочных испытаний, проведенных испытательным центром продукции вагоностроения ООО "ИЦПС". Общий вид опытного образца вагона приведен на рис. 2.



Рис. 2 – Общий вид опытного образца вагона-цистерны модели 15-9544

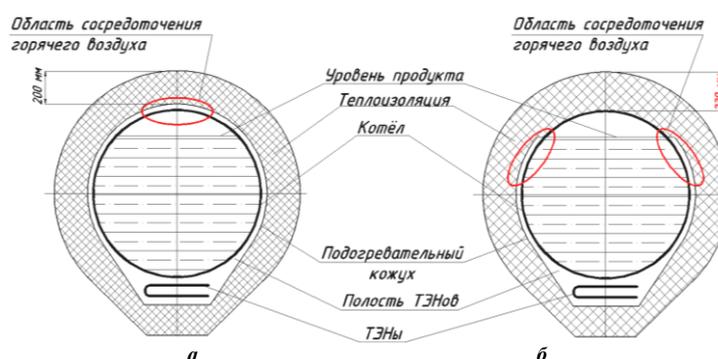


Рис. 3 – Схема распределения разогретого воздуха в подогревательном кожухе вагона:
а – традиционная конструкция; б – конструкция испытываемого вагона модели 15-9544

В традиционных конструкциях вагонов для перевозки расплавленной серы подогретый ТЭНами воздух, поднимаясь, сосредотачивается в верхней части кольцевого зазора подогревательного кожуха и, эффективно подогревая теплоизоляцию, выходит в атмосферу через неплотности теплоизоляционного кожуха.

В кожухе испытываемого вагона-цистерны разрыв кольцевого зазора приводит к перераспределению

Для проверки заявленных в техническом задании эксплуатационных характеристик вагона, связанных с загрузкой, транспортировкой, разогревом и разгрузкой серы, а также для подтверждения конструкторских решений, реализованных в новой модели вагона, в объем предварительных испытаний дополнительно были включены функциональные испытания. Этот вид испытаний имел важное значение при постановке на производство подобной конструкции вагона, так как в этом случае проверка работоспособности всех систем вагона производилась с применением натурального груза – расплавленной серы.

Расплавленная сера обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании нового подвижного состава и проведении испытаний [4-6]. Температура плавления (кристаллизации) составляет 114,5 °С, оптимальная температура для проведения загрузки-разгрузки 125-150 °С, Перегрев серы нежелателен, т.к. превышение температуры более 180°С приводит к увеличению вязкости, снижению текучести и ухудшению показателей качества серы в целом.

Для проведения функциональных испытаний был представлен опытный образец вагона. Основной целью испытаний являлась экспериментальная проверка работоспособности устройств загрузки-разгрузки, систем теплоизоляции и электроразогрева, а также проверка теплотехнических параметров вагона требованиям нормативно-технической документации [7] и сопоставление с результатами проведенных расчетов.

Основным конструктивным отличием опытного образца вагона, имеющим отношение к функциональным испытаниям, в сравнении с эксплуатируемыми вагонами подобного типа является разрыв кольцевого зазора между стенкой котла и оболочкой кожуха в верхней части вагона (рис. 3).

горячего воздуха ниже уровня продукта, интенсифицируя, таким образом, теплообмен и вынуждая разогретый воздух совершать полезную работу. В верхней части вагона слой теплоизоляции увеличен на 15%, что положительно сказывается на теплотехнических характеристиках вагона.

Кроме того, на опытном образце вагона в части систем теплоизоляции и электроразогрева применены:

- теплоизоляция из тонкого базальтового волокна в стеклофольмоткани;

- кожух теплоизоляции с днищами из композиционных материалов для снижения теплоотдачи от набегающих потоков воздуха и обечайкой из листов коррозионностойкой стали с полированной "зеркальной" внешней и внутренней поверхностями в целях отражения длинноволновой части спектра при теплообмене излучением;

- система разогрева, оборудованная тепловыми экранами для устранения местного перегрева нижней части котла, обеспечения равномерного разогрева и исключения деформации обечайки котла и сублимации серы.

К особенностям устройств загрузки-разгрузки испытываемого вагона в отличие от эксплуатируемых вагонов следует отнести крышку арматурного отсека кожуха теплоизоляции кулисной конструкции, не выходящую за габарит вагона при открытии, люк-лаз с диаметром 500 мм, удовлетворяющий требованиям нормативных документов [8], и обеспечивающий беспрепятственный доступ внутрь котла вагона.

Функциональные испытания

Порядок проведения функциональных испытаний вагона состоял из трех этапов:

- этап I: определение коэффициента теплопередачи изоляции котла вагона;

- этап II: загрузка вагона расплавленной серой, остывание серы в вагоне до затвердевания с оценкой времени остывания;

- этап III: разогрев серы в вагоне с определением скорости разогрева, разгрузка вагона.

Испытания были проведены по программам и методикам испытательного центра ООО "ИЦПС" в условиях завода-изготовителя ОАО "НМЗ" (этап I) и одного из крупнейших производителей серы в России – Астраханского филиала ООО "Газпромтранс", пос. Аксарайский (этапы II, III).

На I этапе при определении коэффициента теплопередачи изоляции котла вагона испытываемый порожний вагон был размещен в крытом цехе вдали от источников излучений (солнечный свет, осветительные приборы). Внутренняя и наружная поверхности котла вагона были оборудованы датчиками температуры (рис. 4, в скобках приведены номера симметричных точек: "Н" – точки наружной поверхности вагона; "В" – точки внутренней поверхности вагона вблизи днищ котла; "Ц" – точки внутренней поверхности вагона в центральном сечении котла), внутри котла вагона был установлен источник теплоты (ТЭН), далее производился нагрев внутреннего пространства котла до наступления установившегося теплового режима. При наступлении установившегося теплового режима определены средняя температура воздуха внутри котла вагона

$$T_B = \frac{1}{13} \left(\sum_{i=1}^8 T_{Bi} + \sum_{i=1}^5 T_{Li} \right) = Const ,$$

снаружи котла вагона

$$T_H = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} T_{Hi} = Const ,$$

а также мощность источника тепловыделений Q .

Коэффициент теплопередачи был определен по формуле:

$$K = \frac{Q}{T_B - T_H} . \quad (1)$$

Здесь K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²К; $Q = 2260$ Вт – мощность источника теплоты; $F = 94,1$ м² – площадь теплопередающей поверхности в соответствии с конструкторской документацией; $T_B = 63,13$ °С – температура внутри вагона, $T_H = 18,10$ °С – температура на поверхности вагона.

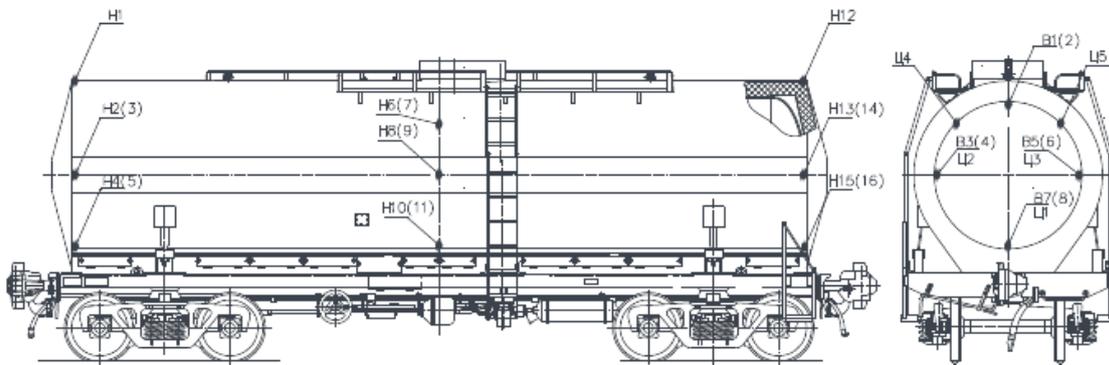


Рис. 4 – Схема расположения точек контроля температуры на испытываемом вагоне

Значение коэффициента теплопередачи изоляции котла вагона, полученное по результатам испытаний, $K = 0,53$ Вт/м²К находится в пределах 13% от расчетного значения $K = 0,47$ Вт/м²К, приведенного в тепло-

техническом расчете вагона и не превышает величину $K \leq 0,7$ Вт/м²К, установленную нормативными документами [3] для изотермических транспортных средств.

На II этапе испытаний произведена загрузка вагона расплавленной серой через люк-лаз (рис. 5), при этом температура расплавленной серы в процессе загрузки составила $t_k = 126^\circ\text{C}$, время загрузки 13 мин.

После завершения загрузки вагон был подан на пути отстоя для оценки времени остывания серы. Период отстоя вагона составил $z = 12$ суток при средней температуре окружающего воздуха 25°C , далее была выполнена постановка вагона на позицию разогрева и разгрузки (III этап испытаний), где были проведены измерения температуры на поверхности твердой фазы серы.

Результаты оценки процесса остывания серы в вагоне представлены в графическом виде (рис. 6). Различие между экспериментальным значением температуры, измеренным на поверхности твердой фазы серы $t_{k(\text{эксн})} = 89^\circ\text{C}$ до начала разогрева и расчетным значением $t_{k(\text{расч})} = 109^\circ\text{C}$ обусловлено наличием остатка жидкой фазы с температурой $t_k \geq t_{\text{пл}}$ ($t_{\text{пл}} = 114,5^\circ\text{C}$ – температура плавления (кристаллизации) серы под остывающим слоем твердой фазы серы (см. рис. 6).

Теоретический график остывания серы и расчетное значение температуры $t_{k(\text{расч})}$ получены аналитическим путем в соответствии с теплотехническим расчетом [9] вагона.

На III этапе испытаний произведены разогрев серы в вагоне и разгрузка вагона. Разогрев серы проводился в дневное время суток, контроль состояния твердой фазы серы выполнен до начала разогрева (оценка времени остывания серы) и в процессе разогрева, появление жидкой фазы зафиксировано после 9 часов непрерывного разогрева (рис. 7).



а



б

Рис. 5 – Загрузка вагона расплавленной серой:
а – постановка вагона в загрузочный терминал;
б – подключение наливной арматуры

Общее время работы системы разогрева составило 28 часов, с учетом простоя вагона в ночное время суток – 48 часов, скорость разогрева жидкой фазы при отсутствии остатков твердой фазы составила $4^\circ\text{C}/\text{час}$, температура расплавленной серы перед разгрузкой – 140°C .

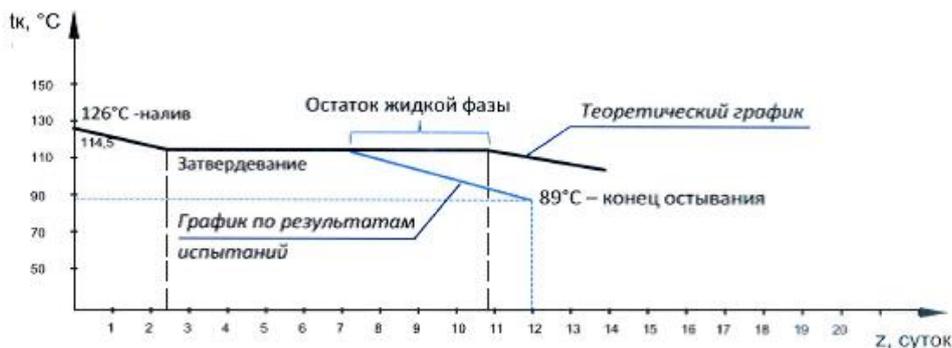
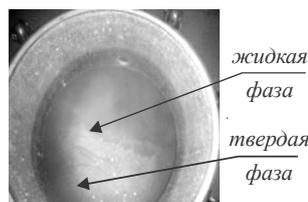


Рис. 6 – Зависимость температуры серы t_k от времени естественного охлаждения в вагоне z , сут, в летний период (температура $+25^\circ\text{C}$)



а



б

Рис. 7 – Разогрев серы в вагоне:
а – вагон в разгрузочном терминале ст. Серная;
б – наличие жидкой фазы серы после 9 часов разогрева (вид из люка-лаза, температура на поверхности жидкой и твердой фаз 120°C)

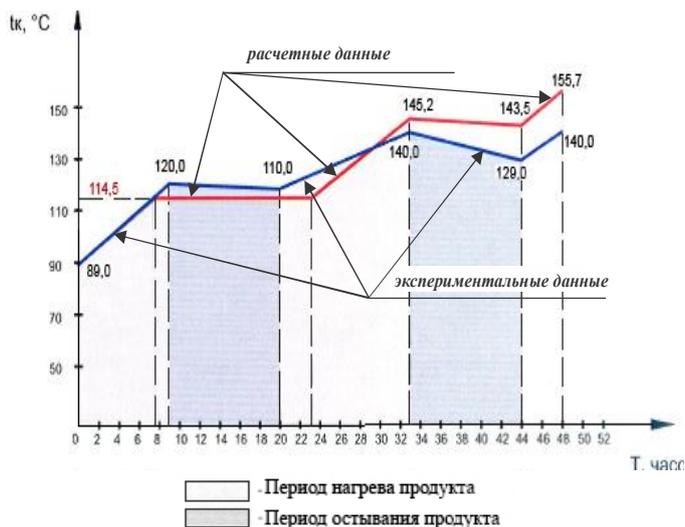


Рис. 8 – Зависимость температуры серы t_k от времени разогрева в вагоне T , час



а



б

Рис. 9 – Разгрузка серы из вагона:
а – подключение сливной арматуры;
б – оценка полноты разгрузки вагона

Результаты оценки процесса разогрева серы в вагоне представлены в графическом виде (рис. 8). Расхождение между экспериментальным и расчетным графиками температуры связано с перераспределением теплоты на фазовое превращение и частичным остыванием серы в период отключения системы разогрева в ночное время.

Разгрузка серы из вагона-цистерны осуществляется перекачиванием с избыточным давлением в котле 0,1 МПа. Время разгрузки с использованием сливной арматуры и труб ДУ50 разгрузочного терминала составило 1,5 часа. Полнота разгрузки проверена визуально с контролем ширины остатка (по хорде) затвердевшей серы в вагоне (рис. 9).

По результатам функциональных испытаний повреждений элементов конструкции вагона и терминалов загрузки-разгрузки не выявлено. Устройства загрузки-разгрузки, системы теплоизоляции и электрозагрева работоспособны и подтверждают заявленные в технической документации эксплуатационные характеристики.

Выводы

Проведенные функциональные испытания показали, что конструкторские решения, реализованные в перспективном вагоне-цистерне модели 15-9544, дали положительный эффект. Для проверки работоспособности всех систем вагона в различных климатических зонах в разные периоды года запланировано проведение подконтрольной эксплуатации образцов из уставочной партии вагонов-цистерн.

Список литературы

- 1 Сергей Ким. Мировой рынок серы ожидают перемены. http://tcj.ru/wp-content/uploads/2014/02/2011_09_34-39_sera.pdf
- 2 Материалы ежегодных конференций "Сера и серная кислота" www.gazpromexport.ru/files/Sulphur_GPE_Moscow_2011.pdf

(CREON) 91.pdf

- 3 Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие. – М.: МПС РФ, Изд-во стандартов, 1993 (№ 889). – 155 с.
- 4 Kogel J.E. Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets and Uses, 7th edition / Kogel J.E., Trivedi N., Barker, J.M. & Krukowski S.T. / Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 2006. – 1568 p.
- 5 Douglas K. Louie Handbook of Sulphuric Acid Manufacturing. Front Cove / Douglas K. Louie / DKL Engineering, Inc., 2005 – Sulfuric acid – 1450 p.
- 6 Ensuring Railroad Tank Car Safety Transportation / Committee for the Study of the Railroad Tank Car Design Process, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, National Research Council – National Academy Press Washington, D.C. 1994. – 152 p.
- 7 Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС): Организация объединенных наций, экономический и социальный совет, европейская экономическая комиссия, комитет по внутреннему транспорту, 61 сессия, 2005.
- 8 ГОСТ Р 51659-2000. Вагоны-цистерны магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия
- 9 9544.00.000 PP19 Вагон-цистерна для расплавленной серы. Модель 15-9544. Расчет теплотехнический: ООО "УК "РТХ", 2014.

Bibliography (transliterated)

- 1 Sergey Kim. Mirovoy ryinok seriy ozhidayut peremenyi. http://tcj.ru/wp-content/uploads/2014/02/2011_09_34-39_sera.pdf
- 2 Materialy ezhegodnykh konferentsiy "Sera i sernaya kislota" www.gazpromexport.ru/files/Sulphur_GPE_Moscow_2011.pdf (CREON) 91.pdf
- 3 Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh грузов. Spravochnoe posobie. – М.: MPS RF, Izd-vo standartov, 1993 (No 889). – 155 pp.
- 4 Kogel J.E. Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets and Uses, 7th edition / Kogel J.E., Trivedi N., Barker, J.M. & Krukowski S.T. / Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 2006. – 1568 p.
- 5 Douglas K. Louie Handbook of Sulphuric Acid Manufacturing. Front Cove / Douglas K. Louie / DKL Engineering, Inc., 2005 – Sulfuric acid – 1450 p.
- 6 Ensuring Railroad Tank Car Safety Transportation / Committee for the Study of the Railroad Tank Car Design Process, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, National Research Council – National Academy Press Washington, D.C. 1994. – 152 p.
- 7 Soglashenie o mezhdunarodnykh perevozkah skoro-

portyaschihsya pischevyyh produktov i o spetsialnyih transportnyih sredstvah, prednaznachennyih dlya etih perevozk (SPS): Organizatsiya ob'edinennyih natsiy, ekonomicheskyy i sotsialnyy sovet, evropeyskaya ekonomicheskaya komissiya, komitet po vnutrennemu transportu, 61 sessiya, 2005.

8 GOST R 51659-2000 Vagonyi-tsisternyi magistralnyih

zheleznyih dorog kolei 1520 mm. Obschie tehnicheckie usloviya

9 9544.00.000 RR19 Vagon-tsisterna dlya rasplavlennoy seryi. Model 15-9544. Raschet teplotehnicheckiy: OOO "UK "RTH", 2014.

Поступила (received) 17.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Функциональные испытания перспективного вагона-цистерны для перевозки расплавленной серы модели 15-9544 / **В.В. Галов, С.Б. Комиссаров, Р.В. Граборов, Р.И. Шейченко, М.А. Чубань** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – 39 (1211). – С. 50-55. Библиогр. 9 назв. –ISSN 2079-0775.

Functional testing of the prospective tank car for carriage of molten sulfur model 15-9544 / **V. Galov, R. Graborov, R. Sheychenko, M. Chuban** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Machines and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 50-55. – ISSN 2079-0775.

Функціональні дослідження перспективного вагона-цистерни для перевезень розплавленої сірки / **В.В. Галов, С. Б. Комісаров, Р.В. Граборов, Р.І. Шейченко, М.О. Чубань** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 39 (1211). – С. 50-55. –ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів (About authors)

Галов Владимир Викторович – руководитель отдела испытательного центра ООО "Инженерный Центр подвижного состава", Санкт-Петербург, РФ; e-mail: gvv@engcenter.ru.

Galov Vladimir – chief of testing centre department of the JSC "Engineering Center of rolling stock", Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: gvv@engcenter.ru.

Комиссаров Сергей Борисович – аспирант кафедры "Теплотехника и теплосиловые установки", Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, РФ; тел.: (812) 457-85-37; e-mail: s.b.komissarov@gmail.com.

Komissarov Sergey – postgraduate student at the Department "The heating engineering and heating power", Emperor Alexander I St.Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: (812) 457-85-37; e-mail: s.b.komissarov@gmail.com.

Граборов Роман Викторович – начальник группы технических расчетов ООО "Научно-инженерный центр УК "РэйлТрансХолдинг", Мариуполь, Украина.

Graborov Roman – chief of technical calculations group of the JSC "Science Engineering Center UK "RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

Шейченко Роман Игоревич – главный конструктор проекта вагонов-цистерн ООО "Научно-инженерный центр УК "РэйлТрансХолдинг", Мариуполь, Украина.

Sheychenko Roman – chief designer of the tank-car project at the JSC "Science Engineering Center UK "RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

Чубань Марина Александрівна – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків, Україна; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Chuban Maryna – NTU "KhPI", postgraduate student at the Department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, Ukraine, e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

