

Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов

© В.Н. Филиппов¹, Г.И. Петров¹, Ю.Н. Шебеко², С.В. Беспалько¹✉, И.К. Сергеев¹

¹ Российский университет транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

² Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

АННОТАЦИЯ

Введение. В 1970-х годах возникла проблема обеспечения пожаровзрывобезопасности транспортировки сжиженных углеводородных газов (СУГ). Была поставлена задача создать новое поколение цистерн для перевозки СУГ с улучшенными технико-экономическими параметрами и показателями для обеспечения пожаровзрывобезопасности.

В работе проведен анализ нормативной документации по вопросам пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ, который показал отсутствие единой политики в области создания вагонов для опасных грузов. По этой причине появился ряд моделей без устройств пожарной безопасности или с недостаточно эффективными защитными устройствами. Таким образом, в предыдущих исследованиях в области вагоностроения вопросы пожарной и взрывобезопасности были недостаточно изучены, и в целом проблема не была решена.

Основные мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ были приняты Российским университетом транспорта (РУТ (МИИТ)). Собрана статистическая информация о пожароопасных отказах и происшествиях с цистернами эксплуатационного парка с их детальным осмотром. Выявлены наиболее уязвимые места котлов и разработаны методы оценки надежности и долговечности. Определены направления совершенствования конструкции котлов, работающих под давлением.

Были проведены следующие работы:

- проанализированы статистические данные об авариях при перевозке опасных грузов;
- разработаны сценарии развития пожароопасных аварийных ситуаций;
- усовершенствованы нормы расчета и проектирования вагонов;
- разработаны математические модели расчета котла;
- рассчитано нестационарное температурное поле котла в очаге пожара с использованием нелинейных уравнений теплопроводности и метода конечных элементов (МКЭ);
- определено напряженно-деформированное состояние котла при пожаре.

Выводы. В результате проведенных РУТ (МИИТ) работ были созданы цистерны для СУГ с усовершенствованными средствами защиты котлов от аварийных воздействий. Необходима выработка единой политики в области создания вагонов для опасных грузов и согласование требований нормативной документации.

Ключевые слова: сжиженные углеводородные газы; пожарная безопасность; перевозка по железным дорогам; вагоны для опасных грузов; котел цистерны; средства защиты от пожароопасных аварий

Для цитирования: Филиппов В.Н., Петров Г.И., Шебеко Ю.Н., Беспалько С.В., Сергеев И.К. Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов (СУГ) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 75–83. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.75-83

✉ Беспалько Сергей Валерьевич, e-mail: bespalco@yandex.ru

Methods of improving the fire and explosion safety of operation of liquefied hydrocarbon gas transportation tanks

© Victor N. Filippov¹, Gennadiy I. Petrov¹, Yury N. Shebeko²,
Serge V. Bespalco¹✉, Ivan K. Sergeev¹

¹ Russian University of Transport (Obraztsova St., 9, Bldg. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The problem of fire and explosion safety of liquefied hydrocarbon gas transportation arose in the 1970s. The task was set to design new generation tanks having improved technical and economic parameters and indicators to ensure fire and explosion safety.

The co-authors have conducted the analysis of regulatory documentation covering the fire and explosion safety of hydrocarbon gas transportation tanks, which shows the absence of any unified policy in the design of cars designated for hazardous cargoes. Hence, a number of models, having no or insufficiently effective protective devices, are produced. Therefore, the issues of fire and explosion safety were understudied in the earlier research works on design of railroad cars, and the problem has not been resolved.

Principal actions aimed at the fire and explosion safety of hydrocarbon gas transportation tanks were implemented by the Russian University of Transport (MIIT). Statistical information on fire hazardous failures and fleet tank accidents, as well as their detailed investigation has been collected. Tank barrel vulnerabilities have been identified; reliability and durability assessment methods have been developed.

Priorities for improving the pressurized tank design are outlined.

The following items of work have been performed:

- analysis of statistical data on hazardous cargo transportation accidents,
- development of fire hazard emergency scenarios;
- improvement of "Railroad car analysis and design regulations",
- development of mathematical models designated for the analysis of tanks,
- identification of an unstable temperature field inside a tank barrel, if in the seat of fire, using non-linear heat conduction equations and the finite element method (FEM),
- identification of the stress-strain state of a tank barrel during a fire.

Conclusions. Following the completion of the work performed by the Russian University of Transport (MIIT), hydrocarbon gas tanks have obtained a better barrel emergency impact protection. A unified policy in the design of cars for hazardous cargoes is needed and regulatory documentation requirements must be harmonized.

Keywords: liquified petroleum gases; fire safety; railway transportation; hazardous cargo cars; tank barrel; safety equipment preventing fire hazards arising as a result of accidents.

For citation: Filippov V.N., Petrov G.I., Shebeko Yu.N., S.V. Bepalco, Sergeev I.K. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):75-83. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.75-83 (rus).

✉ *Sergey Valeryevich Bepalco*, e-mail: bsep-alco@yandex.ru

Введение

В середине 1970-х годов возникла задача обеспечения безопасности перевозок опасных грузов и в первую очередь — сжиженных углеводородных газов (СУГ). При этом следует отметить, что на железнодорожном транспорте в тот период наблюдались инциденты, связанные с герметичностью сосудов, работающих под давлением, с дальнейшим возникновением пожара и взрыва.

Цель настоящей работы состоит в представлении результатов многолетних исследований, проводившихся в Российском университете транспорта (МИИТ), с целью обеспечения пожаровзрывобезопасности цистерн при перевозке сжиженных углеводородных газов по железным дорогам.

Анализ нормативной документации по вопросам пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ

При перевозке по железным дорогам России сжиженных углеводородных газов внимание вопросам безопасности стало уделяться в последние годы XX в., когда происходила массовая перевозка грузов 2 и 3-го классов опасности по железным дорогам.

В 1992 г. были приняты Правила пожарной безопасности на железнодорожном транспорте¹, регламентирующие общие вопросы пожарной безопасности. В 1996 г. утверждены нормативные до-

кументы, относящиеся непосредственно к вопросам перевозки опасных грузов, а именно: Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам² и Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам³.

Одновременно с этим возникла проблема более глубокой проработки мероприятий, связанных с аварийными ситуациями, включая вопросы пожарной безопасности, экологической безопасности, сохранения жизни и здоровья людей. Была поставлена задача создания соответствующих нормативных документов.

В результате был разработан и принят Федеральный закон «О техническом регулировании»⁴ (2002 г.), в соответствии с которым при перевозке по железным дорогам опасных грузов необходимо обеспечение безопасности в следующих сферах: безопасность технических устройств, безопасность на опасном объекте; взрывобезопасность; пожар-

² Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам (с изменениями от 16 октября 2019 г.): введены в действие на 15 заседании СЖТ СНГ, протокол от 5 апреля 1996 г. № 15.

³ Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам: утверждены Министерством по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации и Министерством путей сообщения Российской Федерации 31 октября, 25 ноября 1996 г. № 9-733/3-2, ЦМ-407.

⁴ О техническом регулировании: Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ.

¹ Правила пожарной безопасности на железнодорожном транспорте (ППБО-109-92) (с изменениями и дополнениями): утверждены Министерством путей сообщения Российской Федерации 11 ноября 1992 г. № ЦУО-112).

ная, механическая, термическая, электрическая, химическая, биологическая, радиационная безопасность и безопасность излучений.

Кроме того, был принят Федеральный закон «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации»⁵, который также детализирует требования безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте.

В настоящее время весь создаваемый подвижной состав железных дорог должен удовлетворять требованиям этих нормативных документов, в том числе с точки зрения обеспечения пожаровзрывобезопасности. В наибольшей степени это касается специализированных вагонов, предназначенных для перевозки грузов 2 и 3-го классов опасности.

Помимо названных, были введены нормативные документы, играющие отрицательную роль в обеспечении пожарной безопасности процесса перевозки опасных грузов. В 2012 г. ОАО «ВНИИЖТ» был разработан проект межгосударственного стандарта «Вагоны грузовые...»⁶, в котором при проектировании вагонов для опасных грузов не уделено внимания аварийным расчетным режимам. Кроме того, в 2004 г. из новой редакции Правил⁷ были исключены сценарии пожароопасных аварийных ситуаций.

В результате отсутствия единой политики в области создания вагонов для опасных грузов появился ряд новых моделей вагонов без устройств обеспечения пожаровзрывобезопасности или с недостаточно эффективными защитными устройствами.

Таким образом, в ранее выполнявшихся исследованиях в области вагоностроения вопросы пожаровзрывобезопасности не были достаточно изучены, и в целом проблема не была решена.

Основные мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ

В этой связи Министерство путей сообщения (МПС) и основной владелец цистерн Акционерное общество «СГ-Транс» поставили перед МИИТ задачи создания нового поколения цистерн для СУГ с улучшенными технико-экономическими параметрами и показателями по обеспечению пожарной безопасности перевозок. Основным парком цистерн в этот период являлись цистерны с объемом кот-

ла 51...54 м³, производящиеся фабрикой вагонов в г. Свидница (Польша) и Ждановским заводом тяжелого машиностроения (ЖЗТМ, г. Жданов, ныне г. Мариуполь).

Для решения поставленной задачи МИИТ провел сбор статистической информации о пожароопасных отказах и инцидентах цистерн эксплуатационного парка с детальным осмотром цистерн предприятия «СГ-Транс» на ремонтно-испытательных пунктах в городах Кириши, Кстово, Новокуйбышевске, Долине, Тенгизе, Оренбурге и Тобольске. Цистерны, приписанные к соответствующим ремонтно-испытательным пунктам, работали по всей стране в общесетевых условиях с выходом отдельных вагонов на железные дороги колеи 1435 мм. На основании результатов осмотра и анализа статистических данных о пожароопасных отказах по данным соответствующих предприятий были определены наиболее уязвимые места цистерн и разработаны методики оценки надежности и долговечности с последующим определением потребности в запасных частях [1, 2].

Наряду с осмотрами производилось освидетельствование цистерн с измерением толщины оболочки, анализом качества сварных швов и соответствия основных параметров современным требованиям по обеспечению безопасности.

Были определены следующие направления совершенствования конструкции:

- 1) выбор оптимальных технико-экономических параметров цистерн объемом от 70 до 100 м³;
- 2) совершенствование сливо-наливной арматуры, поскольку было установлено, что конструкция сливо-наливной арматуры, находящейся на цистернах, не учитывала уровень динамических воздействий, возникающих при маневрах и других эксплуатационных режимах;
- 3) улучшение технологии изготовления основного элемента цистерны — котла, работающего под давлением в 2,0 МПа, поскольку было установлено, что, хотя у цистерн для СУГ отсутствует коррозионное воздействие на оболочку, однако котел имеет недостаточное качество сварных швов;
- 4) снижение динамических нагрузок на цистерны и совершенствование их конструкции, поскольку при анализе повреждений цистерн было определено, что они подвергались чрезмерным динамическим нагрузкам, что вызывало повреждения ударной розетки, рамы вагона и возникновение аварийных режимов, связанных с пробоем при маневровых соударениях и вызывающих пожар или взрыв.

Для решения задач, перечисленных выше, было определено, что необходимо изменять технологию

⁵ О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

⁶ Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Проект межгосударственного стандарта. М. : ВНИИЖТ, 2012.

⁷ Правила технической эксплуатации железных дорог : утверждены Приказом Министерства транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286. Последняя редакция действует с 1 июля 2017 г.

изготовления, введя стопроцентный контроль качества сварных швов и стопроцентный контроль герметичности основных листов. Эти предложения потребовали внесения изменений в технологию изготовления котлов на заводах Польши, Украины, а также цистерн для СУГ, изготавливаемых фирмами Hitachi и Kawasaki (Япония). Для повышения надежности и долговечности сливо-наливной арматуры потребовалось привлечение высококвалифицированных подразделений специального машиностроения, к числу которых относится Атомармпроект, входящий в состав компании «Сплав» в Великом Новгороде, который разработал, изготовил, испытал и довел до серийного производства комплекс арматуры на основе шаровых кранов, контрольных кислородных вентилей с сильфонным уплотнением. При этом показатели коррозионной стойкости повысились как для корпусов, так и для клапанов с пружинами, что повысило надежность работы упругих элементов и увеличило их срок эксплуатации до двух лет.

Для снижения динамических нагрузок, воздействующих на цистерну, были проведены работы по созданию эластомерных поглощающих аппаратов при участии МИИТ и фирмы Катах, и последующее серийное производство таких аппаратов было налажено на совместном предприятии ЛЛМЗ Катах в России [3]. Параллельно были разработаны и реализованы мероприятия по изменению конструкции рамы цистерны в части усиления зоны установки поглощающего аппарата и изменению конструкции лап, соединяющих котел с рамой.

При оценке прочностных свойств цистерны для СУГ было выявлено, что наиболее нагруженной зоной котла является выштамповка центральной части котла, через которую должен был осуществляться полный слив продукта. Это было подтверждено результатами прочностных испытаний, и был предложен вариант котла без выштамповки (поддона), а сам котел был спроектирован с листами различной толщины, что позволило, по существу, перейти на новое поколение цистерн с объемом котла от 73 до 75 м³. Изготовление таких котлов осуществлялось на заводах предприятия «Уралвагонзавод» (УВЗ, г. Нижний Тагил), «Атоммаш» (г. Волгодонск), Ждановский завод тяжелого машиностроения (ЖЗТМ, г. Жданов), ООО «Завод “Буммаш”» (г. Петрозаводск). Переход на цистерны с увеличенным диаметром котла позволил повысить их эффективность и снизить число цистерн эксплуатационного парка, требуемых для осуществления необходимого грузооборота.

Для решения задач, связанных с повышением пожаровзрывобезопасности эксплуатации, были проведены следующие работы. Выполнен анализ

статистических данных о пожароопасных авариях и инцидентах при перевозке опасных грузов (сжиженных газов, нефтепродуктов) в вагонах-цистернах и вагонах специального назначения:

- а) по месту инцидента (станция, перегон, погрузка-разгрузка);
- б) скоростям движения, скоростям соударения;
- в) характеристикам участка пути (прямой, кривой).

Выявлены причины возникновения аварий при инцидентах.

Разработаны сценарии развития аварийной ситуации при механическом или тепловом воздействии [4–7]. Определены основные параметры аварийного воздействия на кузов вагона. Произведен выбор расчетных аварийных режимов по критерию возможного сохранения герметичности кузова.

Выполнена оценка живучести кузовов (котлов) цистерн существующего парка при предельно допускаемых сроках службы (требуемая толщина оболочек с учетом коррозии, возможные зоны повреждения, трещины котлов в опорных зонах и узлах их крепления с рамой).

Разработаны предложения по технологии изготовления и контроля качества сварных швов.

Произведен анализ возможных схем установки элементов защиты котла при аварийном воздействии.

Проанализированы существующие методы расчета и испытания вагонов с учетом аварийных воздействий, в том числе воздействий от очага пожара. Осуществлен выбор основных принципов обеспечения защиты котлов цистерн от этих воздействий.

Сформулированы предложения по корректировке Норм расчета и проектирования вагонов⁸ — изменения и дополнения⁹.

Разработаны варианты котлов цистерн с дифференцированной толщиной котла, системой подкрепляющих элементов и узлов соединения котлов с рамой, а также котлов цистерн из коррозионно-стойких материалов (композитов).

Созданы математические модели для расчета элементов котлов с учетом воздействия расчетных аварийных режимов, включая механические и тепловые воздействия от очага пожара [8–12]. Методики основаны на применении следующих методов: принципа Лагранжа; метода конечных элементов (МКЭ); уравнения Лагранжа второго рода. Выполнена верификация новых методик расчета путем

⁸ Нормы расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации. М. : ФГУП ВНИИЖТ – ФГУП ГосНИИВ, 2004.

⁹ Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996.

проведения натурных испытаний при столкновении с аварийными скоростями ($V = 55$ км/ч) и сходом с рельсов и падением с высокой насыпи.

Произведены расчеты статической и динамической нагруженности котлов цистерн для опасных грузов [13, 14]:

- а) осесимметричных нагрузок (внутреннего давления);
- б) локальных (опорных) нагрузок;
- в) устойчивости котла от вакуума.

Определение нестационарного температурного поля котла цистерны в очаге пламени производилось с применением нелинейных уравнений теплопроводности, учетом зависимости теплофизических параметров от температуры; МКЭ; метода Адамса при интегрировании по времени [14, 15].

Разработанная методика определения напряженно-деформированного состояния (НДС) котла цистерн в очаге пламени [14] основана на применении принципа Лагранжа и МКЭ и учитывает следующие особенности конструкции:

- а) зависимость НДС котла от неравномерного температурного поля;
- б) зависимость механических характеристик материала котла от температуры;
- в) влияние огнезащитного покрытия.

Методика определения динамической нагруженности элементов вагона при маневровых соударениях основана на применении принципа Даламбера, методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, уравнений гидродинамики в форме теории мелкой воды, метода характеристик. Методика позволяет учитывать:

- а) разные схемы соударения;
- б) разные типы поглощающих аппаратов;
- в) разные комбинации поглощающих аппаратов;
- г) колебания жидкости в котле цистерны на основе уравнений гидродинамики;
- д) возможность гидроудара.

Разработаны теоретические методы определения динамических качеств грузовых вагонов при движении их по реальным участкам магистральных путей железных дорог и определения неблагоприятных сочетаний параметров ходовых частей вагона и возможных путей схода вагонов с рельсов. Разработаны и реализованы предложения по корректировке параметров пути и ходовых частей грузовых вагонов, обеспечивающие снижение вероятности схода вагонов с рельсов.

Проведены испытания вагонов при соударениях со скоростями 20...25 км/ч и предложены варианты технических средств защиты котлов цистерн для перевозки опасных грузов от пробоя при аварийных соударениях. Разработанные технические средства защиты котлов включают в себя: поглощающие аппара-

ты высокой энергоемкости, предохранители от саморасцепа автосцепок при авариях, торцевые защитные экраны. Все эти технические средства испытаны при расчетных аварийных режимах, приняты к серийному производству и устанавливаются на цистерны для перевозки грузов 2 и 3-го классов опасности. Технические решения защищены патентами.

На основе термодинамических моделей в ходе оценки живучести цистерн при аварийном тепловом воздействии (например, в очаге пожара) разработаны параметры, сконструированы, испытаны и приняты к серийному производству сливо-наливная арматура, предохранительные клапаны и система защитных дуг безопасности для цистерн, перевозящих грузы 2-го класса опасности [16–23]. Комплекс приборов прошел испытания на стендах, на моделях в очаге пожара, на натурных цистернах при сходе с рельсов и опрокидывании с высокой насыпи высотой до 15 м. Конструкции приборов защиты приняты к серийному производству и устанавливаются на вагоны для перевозки опасных грузов.

На основе использования термодинамических моделей развития аварийных ситуаций с котлами цистерн в очаге пожара выбраны и испытаны варианты термозащиты с использованием огнезащитных покрытий типа СГК-1 и СГК-2, обеспечивающие трехкратное повышение времени пребывания цистерн в очаге пожара до начала разрушения котла по сравнению с котлами без покрытия. В сочетании с применением предохранительных клапанов с увеличенным проходным сечением этим существенно снижается вероятность взрыва цистерн при производстве аварийно-восстановительных работ на железных дорогах. Цистерны для СУГ (2-го класса опасности) приняты к серийному производству.

Разработана методика определения условий пробоя котла цистерны чужеродным телом, основанная на применении следующих подходов: определение энергии образования вмятины в условиях текучести материала, оценка прочности по величине предельной контактной силы, аппроксимация вмятины пирамидой или конусом. Методика учитывает случаи:

- а) плоской и выпуклой оболочек;
- б) различной формы внедряемого тела.

Указанные исследования включали в себя конструкторские работы по изготовлению опытных образцов, разработку эксплуатационной документации и технологии серийного производства. Испытания проводились на ремонтно-испытательных пунктах Кириши, Долина, Тенгиз, на стендах фабрики вагонов в Свиднице, Атомармпроекте, на полигонах железнодорожных войск. В испытании участвовали как представители заводов-изготовителей, так и Московский институт теплотехники (МИТ),



Цистерна модели 15-9503 АВП, оснащенная всеми разработанными средствами противопожарной защиты
15-9503 AVP tank model equipped with all recently developed fire protection means

НПО машиностроения (г. Реутов) ВНИИПО, НИИ испытаний ракетных двигателей, некоторые образцы котлов цистерн, изготавливавшихся в Польше и Японии, испытывались в испытательных центрах этих предприятий по единой программе и методике, разработанной МИИТ.

Выводы

В результате проведенных работ удалось создать цистерны с усовершенствованными котлами, новой арматурой и различными техническими средствами защиты котлов от разгерметизации при динамическом и тепловом воздействии. На основании комплекса проведенных работ была создана цистерна модели 15-9503 АВП (рис.) с объемом котла 95 м³ с усовершенствованной сливо-наливной арматурой, в состав которой входит предохранительный клапан увеличенного сечения, что исключает взрывы цистерн при попадании их в очаг пожара, с огнезащитным покрытием типа СГК-1 (СГК-2), увеличивающим огнестойкость в три раза по сравнению с обычной цистерной.

Однако наряду с работами, проводившимися МИИТ, отдельные заводы проводили собственные

конструкторские разработки, которые без должных обоснований зачастую принимались к серийному производству. В некоторых случаях при разработке несущих элементов были нарушены правила конструкторских решений, использовавшихся в течение более ста лет при изготовлении сосудов, находящихся под контролем Ростехнадзора. Некоторые производители без должного обоснования исключили важнейший технологический процесс — термообработку котла после сварки, что может сказаться на долговечности таких цистерн, срок службы которых ранее был установлен равным 30 годам. Для решения вопроса о безопасности эксплуатации цистерны для СУГ в изменившихся условиях необходимо учитывать все конструкторские решения, применяемые на цистернах заводов-изготовителей.

Для принятия кардинальных решений об изменении режимов эксплуатации цистерн для СУГ необходимо иметь достаточный объем статистической информации о состоянии вагонов в количестве не менее 10 % от общего парка цистерн.

Необходима выработка единой политики в области создания вагонов для опасных грузов и согласование требований нормативной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольянинов А.В., Филиппов В.Н. Транспортировка опасных грузов // Железнодорожный транспорт. 1990. № 7. С. 31–33.
2. Дмитриев В.В., Филиппов В.Н., Канивец Р.Ф., Смольянинов А.В. Совершенствование цистерн для сжиженного газа // Железнодорожный транспорт. 1991. № 8. С. 46–48.
3. Filippow W.N., Stanislaw K. Badania prototypowych urzadzzen, ochraniajacych armature idennicewagonow-cystem w awaryjnych sytuacjach // Przegląd Kolesowy. 1993. No. 8. Pp. 31–33
4. Шебеко Ю.Н., Шевчук А.П., Смолин И.М., Филиппов В.Н., Черноплеков А.Н., Бородин А.Н. и др. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железно-

- дорожным транспортом. 1. Постановка задачи и рассмотрение типовых сценариев аварии // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 4. С. 46–51.
5. Шевчук А.П., Присадков В.И., Косачев А.А., Филиппов В.Н., Иванов В.А. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 3. Снижение пожаровзрывоопасности железнодорожных цистерн со сжиженным углеводородным газом // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1993. Т. 2. № 3. С. 35–38.
6. Корольченко А.Я., Горшков В.И., Земский Г.Т., Филиппов В.Н., Шебеко Ю.Н. Правила пожарной безопасности при перевозке в железнодорожных цистернах сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1993. Т. 2. № 3. С. 39–42.
7. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справоч. пособие / под ред. В.Н. Котуранова, В.Н. Филиппова. М. : Изд-во стандартов, 1993. 214 с.
8. Смольянинов А.В., Филиппов В.Н. Методика расчета и проектирования дуг безопасности котлов цистерн // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : тр. II Междунар. науч.-техн. конф. Т. I. М. : МИИТ, 1996. С. 86.
9. Корольченко А.Я., Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н. О влиянии огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожарная безопасность. История, состояние, перспективы : мат. XIV Всеросс. науч.-практ. конф. Ч. 2. М. : ВНИИПО МВД РФ, 1997. С. 271–273.
10. Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Горшков В.И. Исследование влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 1. С. 24–32.
11. Шебеко Ю.Н., Назаренко В.А., Филиппов В.Н., Навценя В.Ю., Костюхин А.К., Замышевский Э.Д. и др. Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. 2004. № 2. С. 73–71.
12. Навценя В.Ю. Развитие научных основ и совершенствование методов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями : дис. ... д-ра техн. наук. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 574 с.
13. Филиппов В.Н., Радзиховский Е.А. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1994. № 3. С. 9–12.
14. Беспалько С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МИИТ, 2000. 424 с.
15. Шебеко Ю.Н., Назаренко В.А., Филиппов В.Н., Навценя В.Ю., Костюхин А.К., Замышевский Э.Д. и др. Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. 2004. № 2. С. 73–71.
16. Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Болодьян И.А. Исследование различных способов противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков : мат. XV науч.-практ. конф. М., 1999. С. 132–133.
17. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves // 5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Shanghai, October 24–29, 1999. International Academic Publishers, 1999. Pp. 215–226.
18. Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Токарев П.М. Исследование способов защиты железнодорожных цистерн для перевозки СУГ от воздействия тепловых нагрузок в условиях пожара // Безопасность движения поездов : сб. тр. М. : МПС МИИТ, 1999. С. IV-17–IV-18.
19. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels // Conference Proceedings of Interflame'99, 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, UK, 29 June – 1 July, 1999. London : Interscience Communications Ltd., 1999. Pp. 1141–1146.
20. Филиппов В.Н., Недорчук Б.Л., Козлова Д.И., Скуратов А.Е. Повышение экологической безопасности перевозок жидких опасных грузов в железнодорожных цистернах за счет предотвращения утечек // Безопасность движения поездов : сб. тр. М. : МПС МИИТ, 2000. Книга II. С. V–19.

21. Nedorchuk B.L., Filippov V.N., Shebeko Yu.N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials // *Pojazdy szynowe na przełomie wieków*. Krakow : Arlamow, 2000. Vol. 1. Pp. 197–203.
22. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N. Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases // *Pojazdy szynowe na przełomie wieków*. Krakow : Arlamow, 2000. Vol. 3. Pp. 109–118.
23. Страхов В.П., Крутов В.М., Шебеко Ю.Н. О возможности использования конструктивной огнезащиты для перевозки грузов в железнодорожных цистернах // *Безопасность движения поездов* : сб. тр. М. : МИИТ, 2005. VII-24–VII-25.

REFERENCES

1. Smolyaninov A.V., Filippov V.N. Transport of dangerous goods. *Railway transport*. 1990; 7:31-33. (rus).
2. Dmitriev V.V., Filippov V.N., Kanivets R.F., Smolyaninov A.V. Improvement of tanks for liquefied gas. *Railway transport*. 1991; 8:46-48. (rus).
3. Filippov W.N., Stanislaw K. Badaniaprototypowychurządzeń, ochraniających armaturę idennicewagonów-cystern w awaryjnychsytuacjach. *PrzeglądKolesowy*. 1993; 8:31-33. (pol).
4. Shebeko Yu. N., Shevchuk A.P., Smolin I.M., Filippov V.N., Chernoplekov A.N., Borodkin A.N., et al. Fire and explosion safety of transportations of liquefied hydrocarbon gases by rail. 1. Statement of the problem and consideration of typical scenarios of accident. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(4):46-51. (rus).
5. Shevchuk A.P., Prisdakov V.I., Kosachev A.A., Filippov V.N., Ivanov V.A. Pozharovzryvobezопасnost transportations of liquefied petroleum gases by rail. 3. Reduction of fire and explosion hazard of railway tanks with liquefied petroleum gas. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 2(3):35-38. (rus).
6. Korolchenko A.Ya., Gorshkov V.I., Zemsky G.T., Filippov V.N., Shebeko Yu.N. Fire safety Rules for transportation of liquefied petroleum gases in railway tanks. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 2(3):39-42. (rus).
7. *Specialized tanks for the transport of dangerous goods : reference. manual* / V.N. Koturanova, V.N. Filippov (ed.). Moscow, Publishing house of standards, 1993; 214. (rus).
8. Smolyaninov A.V., Filippov V.N. A method for calculation and design of safety arcs for railway tanks. Actual problems of railway transport. *Actual problems of railway transport : Proceedings of 2nd International Scientific and Technical Conference. Vol. 1*. Moscow, MIIT Publ., 1996; 86. (rus).
9. Korolochenko A.Ya., Shebeko Yu.N., Filippov V.N. An influence of a fire retardant coating on a behavior of LPG vessel in a fire. *Fire Safety. History, state of art, perspectives. Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow, VNIPO Publ., 1997; 271-273. (rus).
10. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Gorshkov V.I. An investigation of an influence of a fire retardant coating on a behavior of a LPG vessel in a fire. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(1):24-32. (rus).
11. Shebeko Yu.N., Nazarenko V.A., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Zamyshvsky E.D. et al. Experimental research of thin-walled envelope behavior in test flame. *Pozharnaya bezопасnost/Fire Safety*. 2004; 2:73-71. (rus).
12. Navtsenya V.Yu. *Development of scientific bases and improvement of methods of ensuring fire and explosion safety of technological equipment with combustible gases and liquids : thesis for the degree of doctor of technical Sciences*. Moscow, FGU VNIPO EMERCOM of Russia, 2003; 574. (rus).
13. Filippov V.N., Radzikhovsky E.A. Investigation of the behavior of cars in an emergency collision. *VNIIZHT Scientific Journal*. 1994; 3:9-12. (rus).
14. Bepalko S.V. *Development and analysis of models of damaging effects on boilers of tanks for transportation of cryogenic products : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, MIIT, 2000; 424. (rus).
15. Shebeko Yu.N., Nazarenko V.A., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Zamyshvsky E.D. et al. Experimental study of the behavior of a thin-walled shell in a flame hearth. *Fire safety*. 2004; 2:73-71. (rus).
16. ShebekoYu.N., Filippov V.N., Bolodyan I.A. An investigation of methods of a fire protection of LPG vessels. Problemy gorenija i tusheniya požarov na rubezhe vekov. *Combustion Problems and a Fire Extinguishing on a boundary of Century : Proceedings of the 15th scientific conference*. Moscow, VNIPO Publ., 1999; 132-133. (rus).

17. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves. *5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Shanghai, October 24-29, 1999*. International Academic Publishers, 1999; 215-226. (rus).
18. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Tokarev P.M. An investigation of methods for a protection of LPG railway tanks at a thermal load from a fire. *Safety of Railways : Proceedings*. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 1999; 4/17-4/18. (rus).
19. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N., Navzenya V.Yu., Kostyuhin A.K., Tokarev P.M. et al. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. *Conference Proceedings of Interflame '99, 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, UK, 29 June - 1 July, 1999*. London, Interscience Communications Ltd., 1999; 1141-1146.
20. Filippov V.N., Nedorchuk B.L., Kozlova D.I., Scuratov A.E. An elevation of an ecological safety of liquid hazardous goods transportation in railway tanks. *Safety of Railways : Proceedings*. Book 2. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2000; 5/19. (rus).
21. Nedorchuk B.L., Filippov V.N., Shebeko Yu.N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials. *Pojazdy szynowe na przelomie wiekow*. Krakow, Arlamow, 2000; 1:197-203. (pol).
22. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A., Filippov V.N. Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pojazdy szynowe na przelomie wiekow*. Krakow, Arlamow, 2000; 3:109-118. (pol).
23. Strakhov V.P., Krutov V.M., Shebeko Yu.N. A possibility of an application of a constructive fire protection for railway tanks. *Safety of Railways : Proceedings*. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2005; 7/24-7/25. (rus).

Поступила 04.09.2020, после доработки 19.10.2020; принята к публикации 20.11.2020

Received September 4, 2020; Received in revised form October 19, 2020; Accepted November 20, 2020

Информация об авторах

ФИЛИПPOB Bиктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 546422; Scopus Author ID: 57205076108; e-mail: filipovvn@gmail.com

ПЕТРОВ Геннадий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 703184; Scopus Author ID: 57206464834; e-mail: petrovgi@gmail.com

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

БЕСПАЛКО Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Балашиха, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57215138824; РИНЦ ID: 274453; ORCID: 0000-0002-6027-6039; e-mail: bespalco@yandex.ru

СЕРГЕЕВ Иван Константинович, ассистент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1048369; ORCID: 0000-0001-8910-7573; e-mail: vana1997@yandex.ru

Information about the authors

Victor N. FILIPPOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 546422; Scopus Author ID: 57205076108; e-mail: filipovvn@gmail.com

Gennadiy I. PETROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 703184; Scopus Author ID: 57206464834; e-mail: petrovgi@gmail.com

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Serge V. BESPALCO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 274453; Scopus Author ID: 57215138824; ORCID: 0000-0002-6027-6039; e-mail: bespalco@yandex.ru

Ivan K. SERGEEV, Assistant of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1048369; ORCID: 0000-0001-8910-7573; e-mail: vana1997@yandex.ru