

В. Н. ФИЛИППОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

В. Г. ПОПОВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Химия и инженерная экология", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

С. В. БЕСПАЛЬКО, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; e-mail: besp-alco@yandex.ru)

Ю. Н. ШЕБЕКО, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

В. Ю. НАВЦЕНЯ, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры "Управление безопасностью в техносфере", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

УДК 614.841.12

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЦИСТЕРН ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Представлены результаты многолетних исследований, проводившихся в Московском государственном университете путей сообщения совместно с ВНИИПО и другими организациями и посвященных обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для сжиженных углеводородных газов. Исследования включали теоретические и экспериментальные исследования аварийных ситуаций, связанных с динамическими нагрузками и тепловыми воздействиями. Разработаны методики расчета с уточнением параметров расчетных схем по экспериментальным данным. Предложены средства защиты в виде предохранительных клапанов, огнезащитных покрытий, дуг безопасности, а также выбраны параметры контрольной, сливноналивной и предохранительной арматуры. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность их применения. Спроектировано семейство цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов, которые были изготовлены на предприятиях России, Украины, Японии, Польши.

Ключевые слова: пожаровзрывобезопасность; железнодорожная цистерна; сжиженные углеводородные газы; аварийная ситуация; средства защиты; тепловые воздействия; предохранительный клапан; дуги безопасности; огнезащитное покрытие.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49

Введение

Вот уже более 30 лет МИИТ проводит исследования по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн совместно с организациями атомной, оборонной промышленности и др. В качестве объекта исследований в первую очередь рассматриваются цистерны для сжиженных углеводородных газов (СУГ) как наиболее опасный вид подвижного состава. Результаты этих исследований были опубликованы в работах [1–22], а в настоящей работе изложены обобщенные результаты данных исследований.

При изучении многочисленных аварийных ситуаций было выявлено, что их главными причинами являются: несовершенство конструкции, в том

числе автосцепных устройств и арматуры; ошибки персонала и т. п. На основе статистических данных были определены сценарии аварийных ситуаций. Установлено, что аварийные ситуации могут происходить как в пределах станций, так и на перегонах, и в зависимости от места аварии были определены тепловые режимы. При этом в качестве критерия для оценки конструкций было принято время безопасного пребывания в очаге пожара до взрыва (разрушения), что призвано обеспечить необходимое время для развертывания формирований противопожарной службы.

При выработке мероприятий по минимизации аварийных ситуаций в части автосцепного устрой-

ства в качестве возможных технических средств защиты было установлено, что такие цистерны должны иметь эффективные поглощающие аппараты, а также предохранители от саморасцепа. Эффективность предложенных технических решений была доказана экспериментальным и расчетным путем.

Результаты исследований пожаровзрывобезопасности цистерн

В части непосредственной защиты от тепловых воздействий были предложены различные варианты технических средств защиты, в том числе предохранительные клапаны, огнезащитные покрытия и др. При этом для моделирования аварийных режимов и выбора рациональных параметров устройств были разработаны математические модели, реализованные в виде пакета программ для ЭВМ. При отработке методики расчета была проведена серия модельных экспериментов с применением теории подобия. По результатам экспериментов было установлено удовлетворительное соответствие результатов теоретических моделей и экспериментов.

В части состояния котлов цистерн для СУГ была обследована группа цистерн, находившихся длительное время (до 30 лет) в эксплуатации. Были оценены прочностные свойства котла как основного элемента. Выявлено отсутствие заметных коррозионных повреждений котла при перевозке углеводородных газов. В экспериментах были определены значения давления в котле, приводящие к его разрушению. Было установлено также, что наиболее опасными зонами являются поддон и место крепления лап со сливными выштамповками. По результатам ресурсных испытаний было сформулировано требование, в соответствии с которым при изготовлении цистерн для СУГ нового поколения необходимо обеспечивать 100 %-ный контроль качества сварных швов.

Проведенные испытания позволили конструктивно переработать наиболее нагруженные элементы котла, что обеспечило более рациональное распределение материала с точки зрения необходимой прочности при минимальном весе. В результате была принята к серийному производству конструкция котла без сливного поддона и с дифференцированной толщиной.

В рамках работ по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ была предложена версия переработанной контрольной, сливноналивной и предохранительной арматуры с использованием конструктивных решений, принятых в атомном машиностроении. В частности, в контрольных вентилях, разрабатываемых «АтомАрс-Проектом» (г. Великий Новгород), предполагается использовать сильфонные запоры вместо традиционных сальниковых уплотнений. Кроме того, при-

менявшийся ранее классический вентиль с клапаном заменен на шаровой кран, при изготовлении которого использованы современные материалы, в том числе нержавеющая сталь. Применение нержавеющей стали и современных уплотнений в шарнирных кранах позволило повысить межремонтный ресурс с 1 до 2 лет безопасной эксплуатации, что резко снизило затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Для определения динамических режимов воздействия на сливноналивную арматуру были проведены специальные испытания. По их результатам была рекомендована новая компоновка сливноналивных труб, повернутых на 90° относительно продольной оси котла, с раскреплением двух сливных труб раскосами в виде фермы. Такое решение позволило существенно снизить вероятность обрыва элементов сливноналивной арматуры.

Важным фактором обеспечения безопасности в условиях теплового воздействия на котел являются конструкция и параметры предохранительных клапанов. По международным стандартам в правилах расчета и проектирования установлено, что диаметр проходного сечения предохранительного клапана должен зависеть от вместимости котла. Такой подход при переходе на выпуск цистерн с увеличенной вместимостью (до 95 м³), по существу, должен был привести к увеличению числа предохранительных клапанов. При этом было установлено, что существующий предохранительный клапан с проходным сечением типа ДУ 32 не обеспечивает пребывание котла в очаге пожара при расчетных аварийных тепловых воздействиях.

На основании результатов модельных экспериментов были разработаны теоретические модели, позволяющие учесть увеличение объема жидкой фазы при тепловых воздействиях на котел и обосновать режим сброса через предохранительный клапан не газовой, а жидкой фазы. Такой подход предъявляет принципиально иные требования к выбору рациональных параметров предохранительных клапанов.

С помощью реализованных на ЭВМ теоретических моделей были выполнены расчеты процесса пожара с учетом работы предохранительного клапана. При расчетах варьировались: вид сжиженного газа, параметры работы предохранительного клапана, толщины огнезащитного покрытия и теплоизоляции, а также степень аварии. Результаты расчета одного варианта показаны на рис. 1. При этом в соответствии с разработанными сценариями аварийных ситуаций [5] различаются:

- авария 1-й степени — огневое воздействие в течение 24 ч на верхнюю зону котла площадью 7 м² при тепловом потоке 100 кВт/м²;

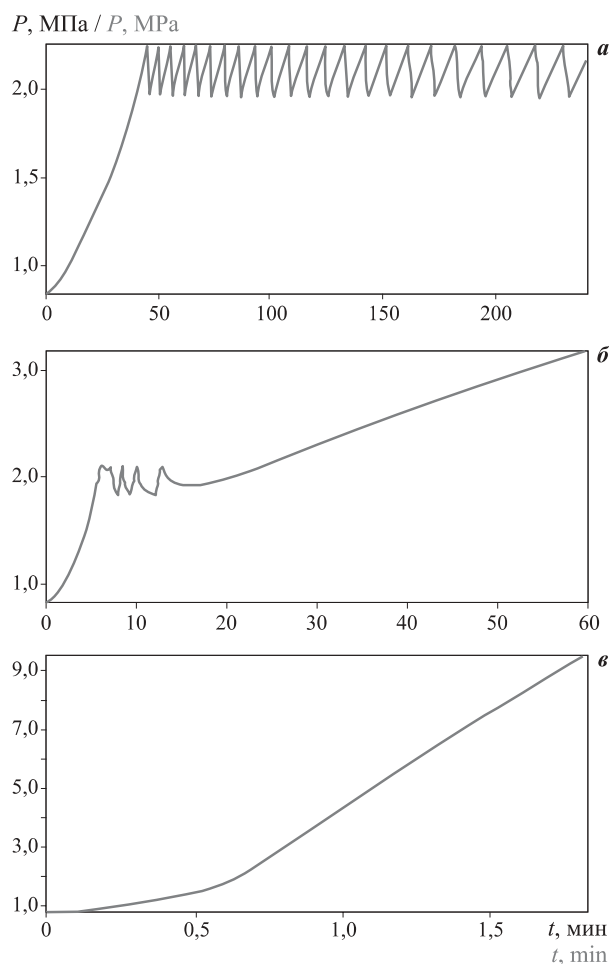


Рис. 1. Зависимость давления СУГ от времени при аварии 1 (а), 2 (б) и 3-й (в) степени

Fig. 1. Dependence of an LPG pressure on time at the accident of the 1st (a), 2nd (b) and 3rd (v) degree

- авария 2-й степени — огневое воздействие в течение 1 ч на нижнюю зону котла площадью 50 м² при тепловом потоке 100 кВт/м²;
- авария 3-й степени — огневое воздействие в течение 2 ч на всю поверхность котла при тепловом потоке 400 кВт/м².

По результатам расчетов были определены параметры нового варианта предохранительного клапана — с увеличенным диаметром проходного сечения. Такие клапаны были разработаны “Атом-АрмПроектом” и испытаны на стендовой базе “Атом-АрмПроекта” и в ЦКБА (г. Санкт-Петербург) (рис. 2). При испытаниях были учтены результаты проведенных ранее натурных экспериментов на цистернах. Было признано целесообразным рекомендовать установку двух предохранительных клапанов на цистерну вместимостью до 95 м³. Один из таких клапанов штатный, имеющий относительно малый диаметр проходного сечения и расположенный по штатной схеме на крышке люка-лаза. Он должен изготавливаться из современных материалов, включая нержавеющую сталь и пружины со стабильными



Рис. 2. Предохранительный клапан и дуги безопасности на цистерне

Fig. 2. Safety relief valve and safety arcs on the tank

жесткостными характеристиками в течение всего периода эксплуатации.

Предохранительный клапан увеличенного сечения разрабатывался и испытывался в двух вариантах, один из которых предусматривает применение разрывных мембран. Срабатывание клапана и мембран должно происходить при аварийном тепловом воздействии по достижению внутреннего давления 30 атм. Установка такого предохранительного клапана осуществляется в зоне расположения дуг безопасности новой конструкции.

Конструкция дуг безопасности (см. рис. 2) с вариантами их установки разрабатывалась для цистерн с котлами различного диаметра. Такой подход позволяет снизить вероятность повреждения котла в зоне сопряжения с дугами безопасности. На основе экспериментов со сходами цистерн с высокой насыпи были разработаны требования проектирования дуг и узлов для связи элементов дуг с оболочкой.

На основе результатов расчетов и модельных испытаний по определению времени пребывания цистерны в очаге пожара были разработаны, испытаны на моделях и запущены в серийное производство огнезащитные покрытия, обеспечивающие увеличение в 2,5–3,5 раза времени безаварийного пребывания цистерны в очаге пожара. Эти исследования проводились при участии специалистов Московского института теплотехники. В качестве огнезащитного покрытия использовались покрытия типа СГК. В испытаниях применялись опытные модели в виде заземленных пластин с различными вариантами огнезащитного покрытия и воздействия тепла. Полученные результаты позволили уточнить параметры расчетных схем для теоретической оценки поведения котла в очаге пожара.

На основе всего комплекса проведенных испытаний было разработано семейство цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов, изготов-



Рис. 3. Цистерна нового поколения для перевозки СУГ
Fig. 3. New type of the railway tank for the LPG transportation

ление которых осуществлялось на предприятиях России, Украины, Японии, Польши. В наиболее полном объеме все предложения по обеспечению пожаровзрывобезопасности были реализованы в цистернах модели 15-9503-АВП, изготовленных в г. Мариуполе (рис. 3).

Выводы

Таким образом, результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований, которые проводили МИИТ, ВНИИПО совместно с другими организациями, позволили решить важную проблему по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для сжиженных углеводородных газов.

Для этого были разработаны и внедрены новые конструкторские решения и технические средства, а именно: предохранительные клапаны, огнезащитные покрытия, модернизированные варианты контрольной, сливоналивной и предохранительной арматуры, новая компоновка сливоналивных труб, конструкция дуг безопасности и узлов их крепления. Это нашло применение в новом семействе цистерн для перевозки СУГ.

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 urzadzen, ochraniajacych armature i dennice wagonow-cystern w awaryjnych sytuacjach // Przegląd Kolesowy. — 1993. — No. 8. — P. 31–33 (in Polish).
4. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справоч. пособие / Под ред. Котуранова В. Н., Филиппова В. Н. — М. : Изд-во стандартов, 1993. — 214 с.
5. Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М., Филиппов В. Н., Черноплеков А. Н., Бородкин А. Н., Симонов О. А., Гуринович Л. В. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 1. Постановка задачи и рассмотрение типовых сценариев аварии // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1992. — Т. 1, № 4. — С. 46–51.
6. Шевчук А. П., Присадов 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.
7. 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.
8. Филиппов В. Н., Радзиховский Е. А. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1994. — № 3. — С. 9–12.
9. Филиппов В. Н., Канивец Р. Ф., Шмыров Ю. А., Дмитриев В. В., Скуратов А. Е. Повышение эксплуатационной надежности цистерн для сжиженных газов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1995. — № 6–8.
10. Смольянинов А. В., Филиппов В. Н. Методика расчета и проектирования дуг безопасности котлов цистерн // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : труды II Международной научно-технической конференции. — М. : МИИТ, 1996. — Т. I. — С. 86.
11. 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 : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО МВД РФ, 1997. — Ч. 2. — С. 271–273.
12. 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.
13. Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н., Навценя В. Ю., Костюхин А. К., Токарев П. М., Замышевский Э. Д. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1999. — Т. 8, № 4. — С. 33–42.

14. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishhevski E. D. 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. — P. 1141–1146.
15. 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 : материалы XV научно-практической конференции. — М., 1999. — С. 132–133.
16. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishhevski E. D. 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. — P. 215–226.
17. 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.
18. 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.
19. Nedorchuk B. L., Filippow V. N., Shebeko Yu. N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials // Pojazdy szynowe na przelomie wikow. — Krakow : Arlamow, 2000. — Vol. 1. — P. 197–203 (in Polish).
20. 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 wikow. — Krakow : Arlamow, 2000. — Vol. 3. — P. 109–118 (in Polish).
21. Шебеко Ю. Н., Назаренко В. А., Филиппов В. Н., Навценя В. Ю., Костюхин А. К., Замышевский Э. Д., Головин В. В., Беспалько С. В. Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. — 2004. — № 2. — С. 71–73.
22. 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. — С. VII-24–VII-25.

Материал поступил в редакцию 13 сентября 2017 г.

Для цитирования: Филиппов В. Н., Попов В. Г., Беспалько С. В., Шебеко Ю. Н., Навценя В. Ю. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.

English

RESULTS OF COMPLEX RESEARCHES OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF RAILWAY TANKS FOR TRANSPORTATION OF LIQUEFIED PETROLEUM GASES

FILIPPOV V. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

POPOV V. G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Chemistry and Engineering Ecology Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

BESPALKO S. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: besp-alco@yandex.ru)

SHEBEKO Yu. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Department of Fire Safety of Industrial Facilities, Technologies and Modeling of Technogenic Accidents, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

NAVTSENYA V. Yu., Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate, Professor of Management of Safety in a Technosphere Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

ABSTRACT

This study is dedicated to a description of results of complex investigations on fire and explosion safety of railway tanks for a transportation of liquefied petroleum gases (LPG) carried out by Moscow state railway university together with organizations of various branches of industry.

The main types of accidents were determined on a basis of statistical data.

There were carried out experimental and theoretical investigations of a railway tanks behavior at various accidental regimes connected with various dynamical and thermal actions on these tanks. Numerous experiments were carried out on large scale facilities and on small scale facilities with an application of the theory of similarity. Experimental results were used both for a verification of the theoretical models and for more accurate definition of parameters of numerical schemes.

Mathematical models created at the theoretical investigations were used for a software and a following determination of tools for the railway tanks protection.

Measures for a risk reduction and a diminishing of consequences were proposed on the basis of the investigations. Safety relief valves, fire retardant coatings and special controle valves were used for a thermal protection. It was shown that the SGK fire retardant coating can increase a critical time of an action of the fire on the railway tank on 2.5–3.5 times.

A new configuration of loading pipelines was proposed which allowed to decrease substantially a probability of a rupture of the loading facilities. A new configuration of safety arcs was proposed which decreases remarkably a probability of a destruction of the loading valves at accidents with an overturning of the tank.

New safety types of the railways for the LPG transportation were created which are now built in Russia, Ukraine, Japan, Poland.

Keywords: fire and explosion safety; railway tank; liquefied petroleum gases; emergency; means of protection; thermal influences; safety valve; safety arcs; fireproofing coating.

REFERENCES

1. Smolyaninov A. V., Filippov V. N. Transportation of hazardous goods. *Zheleznodorozhnyy transport / Railway Transport*, 1990, no. 7, pp. 31–33 (in Russian).
2. Dmitriev V. V., Filippov V. N., Kanivets R. F., Smolyaninov A. V. An improvement of railway tanks for liquefied petroleum gases. *Zheleznodorozhnyy transport / Railway Transport*, 1991, no. 8, pp. 46–48 (in Russian).
3. Filippow W. N., Stanislaw K. Badania prototypowych urzadzen, ochraniajacych armature i dennice wagonow-cystern w awaryjnych sytuacjach. *Przegląd Kolesowy*, 1993, no. 8, pp. 31–33 (in Polish).
4. Koturanov V. N., Filippov V. N. (eds.). *Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov: spravochnik. posobiye* [Special railway tanks for transportation of hazardous goods. Reference book]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1993. 214 p. (in Russian).
5. Shebeko Yu. N., Shevchuk A. P., Smolin I. M., Filippov V. N., Chernoplekov A. N., Borodkin A. N., Simonov O. A., Gurinovich L. V. Fire and explosion safety of LPG transportation by a railway. 1. Preliminary consideration and typical accident scenarios. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1992, vol. 1, no. 4, pp. 46–51 (in Russian).
6. Shevchuk A. P., Prisdakov V. I., Kosachev A. A., Filippov V. N., Ivanov V. A. Fire and explosion safety of LPG transportation by a railway. 3. A reduction of a fire and explosion hazard of railway tanks for an LPG transportation. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1993, vol. 2, no. 3, pp. 35–38 (in Russian).
7. Korolchenko A. Ya., Gorshkov V. I., Zemskiy G. T., Filippov V. N., Shebeko Yu. N. Fire safety rules at a transportation of LPG by railway tanks. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1993, vol. 2, no. 3, pp. 39–42 (in Russian).
8. Filippov V. N., Radzikhovskiy E. A. An investigation of a railway tanks behavior at an accidental collision. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta / Vestnik of the All-Russian Railway Research Institute*, 1994, no. 3, pp. 9–12 (in Russian).

9. Filippov V. N., Kanivets R. F., Shmirov Yu. A., Dmitriev V. V., Skuratov A. E. An elevation of an operational reliability of railway tanks for a LPG transportation. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta / Vestnik of the All-Russian Railway Research Institute*, 1995, no. 6–8 (in Russian).
10. Smolyaninov A. V., Filippov V. N. A method for calculation and design of safety arcs for railway tanks. In: *Aktualnyye problemy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of railway transport. Proceedings of 2nd International Scientific and Technical Conference]. Moscow, MIIT Publ., 1996, vol. 1, p. 86 (in Russian).
11. 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. In: *Pozharnaya bezopasnost. Istoriya, sostoyaniye, perspektivy: materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fire Safety. History, state of art, perspectives. Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 1997, part 2, pp. 271–273 (in Russian).
12. 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. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1998, vol. 7, no. 1, pp. 24–32 (in Russian).
13. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevsky E. D. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1999, vol. 8, no. 4, pp. 33–42 (in Russian).
14. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevski E. D. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. In: *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.
15. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Bolodyan I. A. An investigation of methods of a fire protection of LPG vessels. In: *Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov. Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 15th scientific conference “Combustion problems and a fire extinguishing on a boundary of centuries”]. Moscow, VNIPO Publ., 1999, pp. 132–133 (in Russian).
16. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevski E. D. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves. In: *5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*, Shanghai, October 24–29, 1999. International Academic Publishers, 1999, pp. 215–226.
17. 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. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 1999, pp. IV/17–IV/18 (in Russian).
18. 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. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2000, part 2, p. V/19 (in Russian).
19. 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 wikow*. Krakow, Arlamow, 2000, vol. 1, pp. 197–203 (in Polish).
20. 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 wikow*. Krakow, Arlamow, 2000, vol. 3, pp. 109–118 (in Polish).
21. Shebeko Yu. N., Nazarenko V. A., Filippov V. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Zamyshesky E. D., Golovin V. V., Bepalko S. V. Experimental research of thin-walled envelope behavior in test flame. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2004, no. 2, pp. 71–73 (in Russian).
22. Strakhov V. P., Krutov V. M., Shebeko Yu. N. A possibility of an application of a constructive fire protection for railway tanks. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2005, pp. VII/24–VII/25 (in Russian).

For citation: Filippov V. N., Popov V. G., Bepalko S. V., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu. Results of complex researches of fire and explosion safety of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 43–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.