

**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; e-mail: Filipovvn@gmail.com)

**Ю. Н. ШЕБЕКО**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны (Россия, 143903, г. Балашиха, Московская область, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: yn\_shebeko@mail.ru)

**В. М. ПОНОМАРЕВ**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры “Управление безопасностью в техносфере”, Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; e-mail: ponomarev.valentin@inbox.ru)

**В. Ю. НАВЦЕНЯ**, д-р техн. наук, профессор кафедры “Управление безопасностью в техносфере”, Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; e-mail: VNavtsenya@rtrn.ru)

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

**О. В. ПЛИЦЫНА**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры “Управление безопасностью в техносфере”, Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; e-mail: plitsa@yandex.ru)

УДК 614.841

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ С СУГ В ОЧАГЕ ПЛАМЕНИ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование различных способов противопожарной защиты железнодорожной цистерны со сжиженными углеводородными газами (СУГ) (предохранительный клапан, вспучивающееся огнезащитное покрытие, тепловая изоляция). Выполнены эксперименты по изучению поведения баллонов с пропаном вместимостью 50 дм<sup>3</sup> с указанными выше элементами противопожарной защиты для случая воздействия пламени горящего дизельного топлива. Показано, что наличие предохранительного клапана предотвращает взрыв резервуара с СУГ в очаге пожара, а наличие вспучивающегося огнезащитного покрытия существенно снижает скорость роста давления в нем и тем самым значительно задерживает момент начала работы предохранительного клапана. Наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных данных с расчетными, полученными с помощью разработанной математической модели. Показано, что результаты работы свидетельствуют о перспективности рассмотренных способов противопожарной защиты для предотвращения взрывов резервуаров с СУГ в очаге пожара.

**Ключевые слова:** модель железнодорожной цистерны с СУГ; очаг горения; методы защиты от огня; экспериментальная апробация; предохранительный клапан; вспучивающиеся огнезащитные покрытия; тепловая деформация; поля тепловых деформаций.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51

### Введение

Широкое использование на практике сжиженных углеводородных газов (СУГ) обусловило применение резервуаров для хранения и транспортировки этих продуктов в различных отраслях промышленности и в быту. Резервуары с СУГ обладают высокой пожарной опасностью, что подтверждается крупными инцидентами с их участием [1–6]. Зачастую эти инциденты протекают по сценарию, при котором резервуар с СУГ подвергается воздействию очага пожара, в результате чего возможен взрыв резервуара

с последствиями, подчас катастрофическими. Для предотвращения таких аварий предлагаются различные способы противопожарной защиты резервуаров, такие как подземное расположение резервуаров, тепловая изоляция их стенок, водяное орошение стенок [7], предохранительные клапаны [8]. Эти и другие меры по противопожарной защите резервуаров рассмотрены также в статьях [9–19] и цитированных в них работах. В частности, в [17–19] экспериментально и теоретически показана перспективность применения теплоогнезащитных оболочек для про-

тивопожарной защиты резервуаров с СУГ, однако не изучено совместное действие таких средств защиты, как огнезащитное покрытие и предохранительный клапан, что может быть важным при их практическом применении, так как инерционность прогрева металлоконструкции резервуара существенным образом может сказываться на работе предохранительного клапана.

В связи с этим настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию совместного влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия и предохранительного клапана на поведение сосудов с СУГ в очаге пожара. Для сравнения, наряду со вспучивающимся огнезащитным покрытием, рассмотрен вариант наличия на стенках резервуара тепловой изоляции.

В комплексе проблем, связанных с безопасностью цистерн для особо опасных грузов, одной из наиболее важных является предотвращение повреждений котлов при действии открытого пламени, так как их разрушение почти с неизбежностью приводит к таким последствиям, как разгерметизация, пролив вредного для окружающей среды продукта или взрыв [14–16, 20, 21].

Следует отметить, что в настоящее время надежность предотвращения взрыва остается крайне низкой, что показывает анализ статистических данных. В литературных источниках данная проблема исследована недостаточно: до недавнего времени соответствующие научно-исследовательские работы проводились не систематически. Кроме того, в научно-технической литературе крайне мало освещены вопросы использования комбинированных способов противопожарной защиты резервуаров.

В последние годы анализ пожаровзрывоопасности объектов транспорта, связанных с перевозкой сжиженных углеводородных газов, проводился, как правило, с позиций риск-ориентированного подхода, направленного на расчет вероятности возникновения пожаровзрывоопасной ситуации [15, 16]. Однако для практики такие расчеты малоинформативны. Здесь требуются апробированные инженерно-технические методы по обеспечению пожаровзрывобезопасности железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пожара.

В целях разработки способов предотвращения и снижения последствий подобных аварий ФГБУ ВНИИПО совместно с МИИТ проведены комплексные экспериментально-теоретические исследования поведения моделей железнодорожных котлов-цистерн с СУГ в очаге пламени.

### Постановка задачи

Одним из наиболее характерных сценариев аварий, имевших место с сосудами с СУГ под давле-

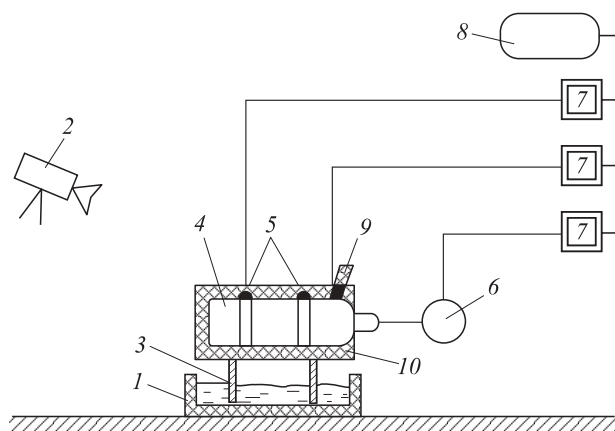
нием (особенно в случае относительно небольших транспортных резервуаров), является взрыв сосуда при воздействии на него очага пожара. Для предотвращения взрыва резервуара с СУГ в очаге пожара предложено несколько возможных способов (их краткий анализ приведен выше), среди которых наиболее простым и надежным представляется использование предохранительных клапанов необходимого проходного сечения (см., например, [7, 8]). При этом, вероятно, большое значение будет иметь местоположение предохранительного клапана — в верхней или нижней части сосуда (в зависимости от этого при раскрытии клапана будет вытекать паровая или жидкая фаза). Вопрос этот не столь прост, как кажется на первый взгляд. С одной стороны, массовая удельная скорость истечения жидкой фазы существенно выше по сравнению с паровой фазой, вследствие чего время сброса газа из аварийного резервуара существенно меньше. С другой стороны, при истечении паров из сосуда происходит интенсивное испарение жидкой фазы [22], сопровождающееся ее охлаждением и уменьшением давления. Какой из факторов будет превалировать, априори неясно.

Возникает еще один вопрос, связанный с оценкой теплового воздействия очага пожара на резервуар с СУГ. В соответствии с требованиями норм предохранительные клапаны транспортного сосуда (например, цистерны) должны быть рассчитаны на воздействие на стенки резервуара воздушной среды с температурой 600 °С, имитирующей очаг пожара. Достаточно ли адекватно это температурное воздействие описывает влияние реального пожара на резервуар с СУГ, остается неясным. Практика показывает, что разгерметизация железнодорожной цистерны с СУГ наблюдается спустя 18–22 мин с момента попадания в очаг горения, несмотря на то что стенки котла-цистерны имеют толщину порядка 22–25 мм. Цель данной работы заключалась в исследовании поведения модели котла-цистерны в очаге горения путем воздействия на него мощного теплового потока и в разработке способа предотвращения его разрушения.

### Методика экспериментальных исследований с резервуаром СУГ

Для изучения различных способов противопожарной защиты резервуаров с СУГ была проведена серия экспериментов в развитие исследований [17–19]. В качестве моделей резервуаров использовали стандартные бытовые баллоны с пропаном вместимостью 50 дм<sup>3</sup>, содержащие 21 кг СУГ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Модельные экспериментальные исследования проводили на баллонах с пропаном без защиты, с огнезащитным покрытием СГК-1, разработанным



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — очаг горения; 2 — видеокамера; 3 — подставка; 4 — баллон; 5 — термодатчики; 6 — датчик давления; 7 — потенциометр; 8 — электрический генератор; 9 — предохранительный клапан; 10 — огнезащитное покрытие

**Fig. 1.** Diagram of the experimental set-up: 1 — cavity with diesel oil; 2 — video camera; 3 — base for location of the vessel with LPG; 4 — vessel with LPG; 5 — thermocouples; 6 — pressure detector; 7 — oscilloscope; 8 — generator of electric voltage; 9 — safety valve; 10 — thermal protection layer

ГП «Московский институт теплотехники» (МИТ), с предохранительным клапаном и огнезащитным покрытием СГК-1 или многослойным покрытием, предложенным НПО «Машиностроение».

В экспериментах определяли: критическое давление разгерметизации баллонов, кинетику роста давления и температуры на внешней поверхности стенки сосуда и момент разрушения. Дополнительно для баллонов с вариантами защиты определяли: избыточное давление в баллоне, при котором происходило срабатывание предохранительного клапана, и толщину огнезащитного покрытия до и после испытаний.

Огнезащитное покрытие СГК-1 наносили на обезжиренную поверхность резервуаров в соответствии с требованиями технических условий [23]. Теплоизоляция представляла собой пакет материалов из нескольких слоев, предложенный НПО «Машиностроение». Непосредственно к баллону прилегал слой полужесткого волокнистого материала, способного к длительной работе при температуре до 450–500 °С. Далее находился слой объемной высокотемпературной ткани (рабочая температура до 1100–1200 °С), обладающей хорошими теплоаккумулирующими свойствами, но имеющей рыхлую структуру. Поверх высокотемпературной ткани были уложены два слоя стеклоткани, за которыми следовал металлический кожух для предотвращения механического повреждения теплоизоляционного слоя.

Для определения температуры стенок резервуаров применяли термодатчики. В случае незащищенных баллонов и при наличии покрытия СГК-1 спай термодатчиков защищали от прямого воздействия пла-

мени намоткой из асбестовой нити. Тем не менее, судя по показаниям термодатчиков, в большинстве указанных опытов прямое воздействие пламени все же имело место. Поэтому полученные данные по температуре стенок вызывают сомнения и в настоящей статье не приводятся. На стенках баллонов с композиционным теплоизоляционным слоем спай термодатчиков приваривали контактной сваркой к нихромовым пластинкам толщиной 0,15 мм, которые, в свою очередь, были приварены к стенкам баллона. При этом теплоизоляционный слой обеспечивал надежную защиту спая термодатчиков от прямого контакта с пламенем.

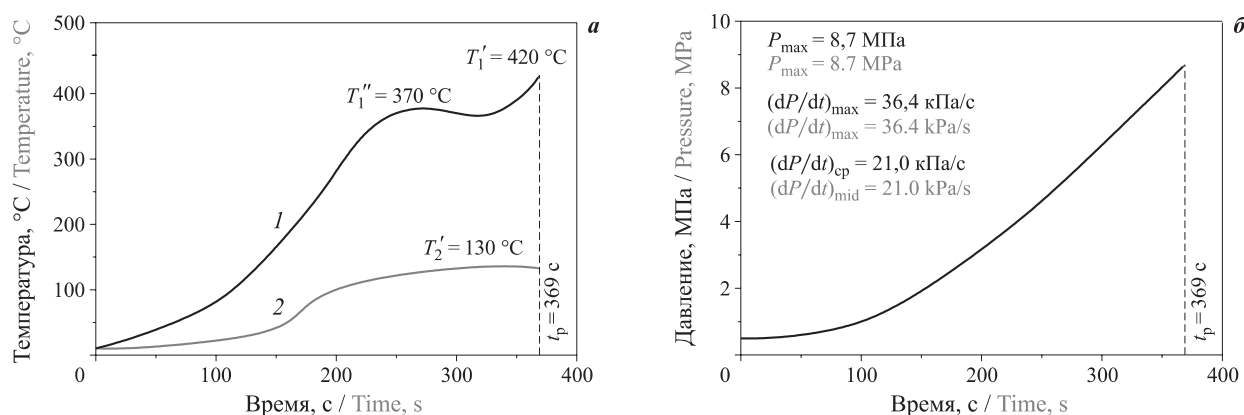
Давление СУГ измеряли с помощью манометрического преобразователя МП-160 с верхним пределом измерения 16 МПа, соединенного с горловиной баллона трубкой, проходящей под слоем грунта для защиты от пламени. В качестве вторичных приборов для записи сигналов с термодатчиков и датчика давления использовали потенциометры типа КСП-4. Дополнительно регистрировали процесс с помощью видеокамеры.

Опыты проводили следующим образом. В горизонтальный металлический поддон размерами 1,2×0,9×0,2 м заливали дизельное топливо в количестве от 50 до 100 л в зависимости от требуемой продолжительности горения (от 25 до 50 мин). Баллон с СУГ устанавливали горизонтально на высоте 0,3 м от поверхности дизельного топлива таким образом, чтобы исключить воздействие очага пламени на запорный вентиль (см. рис. 1).

После установки баллона, открытия запорного вентиля и пуска контрольно-измерительной аппаратуры производили зажигание дизельного топлива. При этом высота пламени составляла 0,8–1,2 м, что обеспечивало практически равномерный охват пламенем боковой поверхности баллона. Определяли зависимости давления СУГ и температуры стенок от времени, а также моменты начала работы предохранительного клапана. По кривой *давление – время* в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 определяли среднюю скорость нарастания давления. После прекращения горения модельного очага и охлаждения баллона до температуры окружающей среды при закрытии предохранительного клапана измеряли толщину слоя вспучившегося огнезащитного покрытия, а после выпуска газа из баллона оценивали состояние стенок, предохранительного клапана и запорного вентиля.

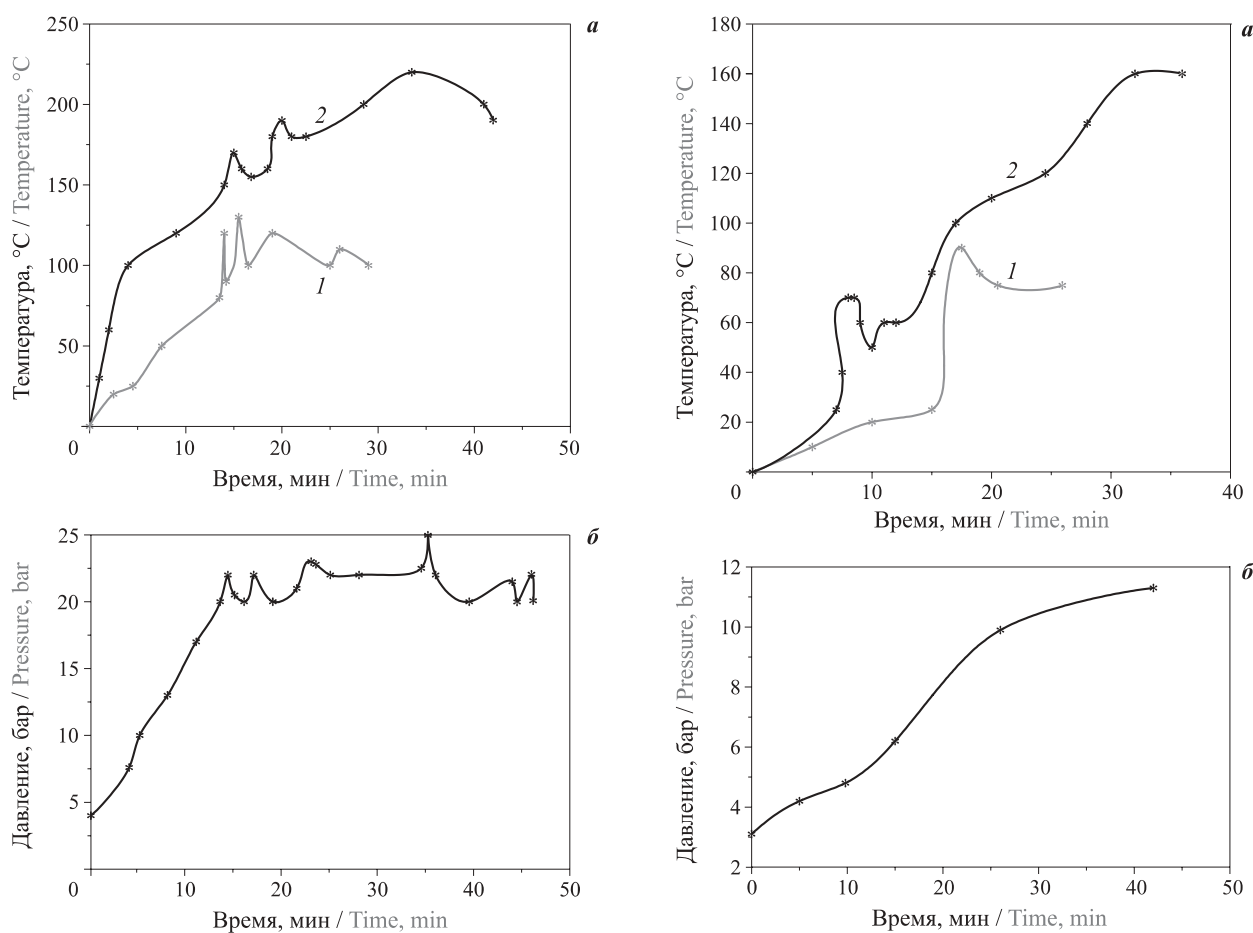
### Экспериментальные данные и их обсуждение

Примеры зависимости температуры и давления от времени показаны на рис. 2–4 соответственно для баллона без защиты, с огнезащитным покрытием



**Рис. 2.** Зависимость температуры на поверхности баллона с СУГ (а) и давления в нем (б) от времени: 1 — температура на внешней боковой поверхности вблизи горловины баллона; 2 — температура вблизи донной части;  $T_1'$ ,  $T_1''$  — температуры, измеренные в разные моменты времени

**Fig. 2.** Dependence of wall's temperature vessel with LPG (a) and pressure of LPG (b) on time: 1 — temperature at external side surface near the neck of vessel; 2 — temperature close to the bottom;  $T_1'$ ,  $T_1''$  — temperatures measured at different points in time



**Рис. 3.** Зависимость температуры боковой поверхности баллона (а) и давления с огнезащитным покрытием СГК-1 и предохранительным клапаном (б) от времени: 1 — температура на внешней боковой поверхности вблизи горловины баллона; 2 — температура вблизи донной части

**Fig. 3.** Dependence of wall's temperature vessel with LPG (a) and pressure of LPG with intumescent fire retardant coating SGK-1 and safety valve (b) on time: 1 — temperature at external side surface near the neck of the vessel; 2 — temperature close to the bottom

**Рис. 4.** Зависимость температуры боковой поверхности баллона (а) и давления с огнезащитным пакетом и предохранительным клапаном (б) от времени: 1 — температура на внешней боковой поверхности вблизи горловины баллона; 2 — температура вблизи донной части

**Fig. 4.** Dependence of wall's temperature vessel with LPG (a) and pressure of LPG with thermal isolation and safety valve (b) on time: 1 — temperature at external side surface near the neck of the vessel; 2 — temperature close to the bottom

ем SGK-1 и предохранительным клапаном, с защитным слоем (НПО “Машиностроение”) и предохранительным клапаном.

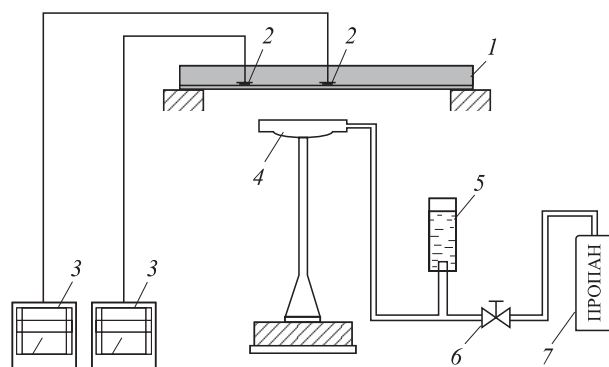
Наличие на стенках баллона вспучивающегося огнезащитного покрытия SGK-1 или слоя тепловой изоляции существенно сдвигает время начала работы предохранительного клапана с 2 мин (баллон без тепловой защиты) до 14–20 мин — с покрытием SGK-1 и более чем до 40 мин — в случае слоя тепловой изоляции. Скорость нарастания давления снижается более чем в 5 раз по сравнению с незащищенным баллоном в зависимости от вида покрытия и его толщины. Следует отметить, что наличие тепловой защиты на стенках баллона хорошо предохраняет стенки от высокотемпературного воздействия, поскольку первоначальная окраска баллона, поверх которой сделана тепловая защита, не пострадала.

Отметим, что длительная эксплуатация железнодорожной цистерны приводит к деформационному старению конструктивной стали [24], что существенным образом сказывается на огнестойкости металлоконструкции железнодорожной цистерны, особенно при попадании “несмачиваемой” оболочки цистерны СУГ.

#### Методика экспериментальных исследований поведения “сухой” оболочки резервуара (без СУГ) в очаге горения

Были проведены также модельные эксперименты [25] по исследованию поведения подкрепленных пластин при воздействии открытого пламени. Данная методика имитирует ситуацию попадания вагона-цистерны без СУГ в очаг горения. Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.

Было проведено два эксперимента. В первом испытывали модель без защиты, во втором — модель с предварительно нанесенным огнезащитным покры-



**Рис. 5.** Схема установки для испытаний пластин: 1 — испытательная модель пластины; 2 — термопары; 3 — самопишущие потенциометры; 4 — газовая горелка; 5 — расходомер; 6 — вентиль подачи газа; 7 — баллон с пропаном

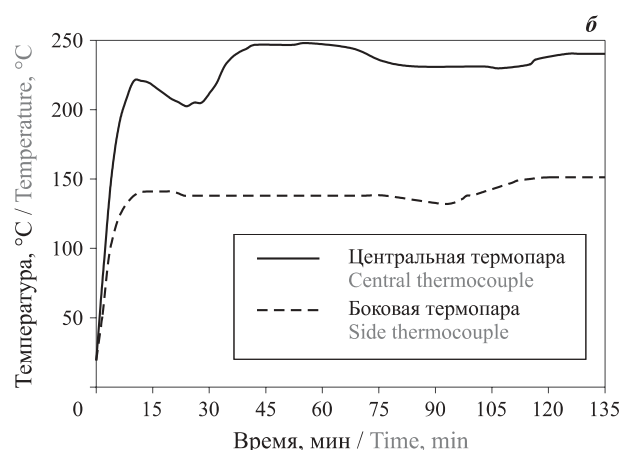
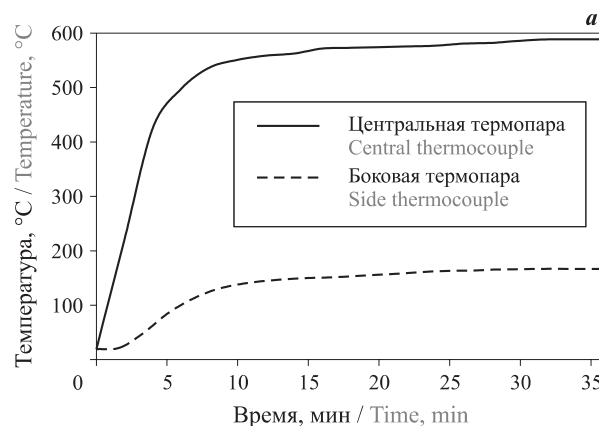
**Fig. 5.** Diagram of the test plates: 1 — experimental model of the plate; 2 — thermocouple; 3 — recording potentiometers; 4 — gas burner; 5 — meter; 6 — gas valve; 7 — vessel with propane

тием SGK-2 (разработка МИИТ). Очаг пламени создавали пропановой горелкой с регулированием расхода газа. В ходе экспериментов определяли температуры и деформации пластины.

На рис. 6 приведены результаты измерения температур, а на рис. 7 — прогибы пластин в нагретом состоянии.

Результаты экспериментальных исследований позволили качественно оценить поведение оболочек в очаге пламени, обосновать применение средств защиты, а также уточнить параметры и проверить методики теоретического моделирования поведения котлов-цистерн в очаге пламени.

Задачу моделирования поведения котла при воздействии пламени [26] решали в два этапа. На первом этапе определяли неравномерное нестационарное температурное поле котла при воздействии внешнего теплового потока. На втором этапе моделировали напряженно-деформированное состояние (НДС) котла при неравномерном нагреве. При этом локальное изменение температуры вызывало как собственно температурные напряжения, так и изменение упругих и прочностных свойств материала оболочки, что также учитывалось при определении НДС котла.



**Рис. 6.** Зависимость температуры модели без защиты (а) и с покрытием SGK-2 (б) от времени

**Fig. 6.** Dependence of temperature test plates without intumescent fire retardant coating (a) and with coating SGK-2 (b) on time



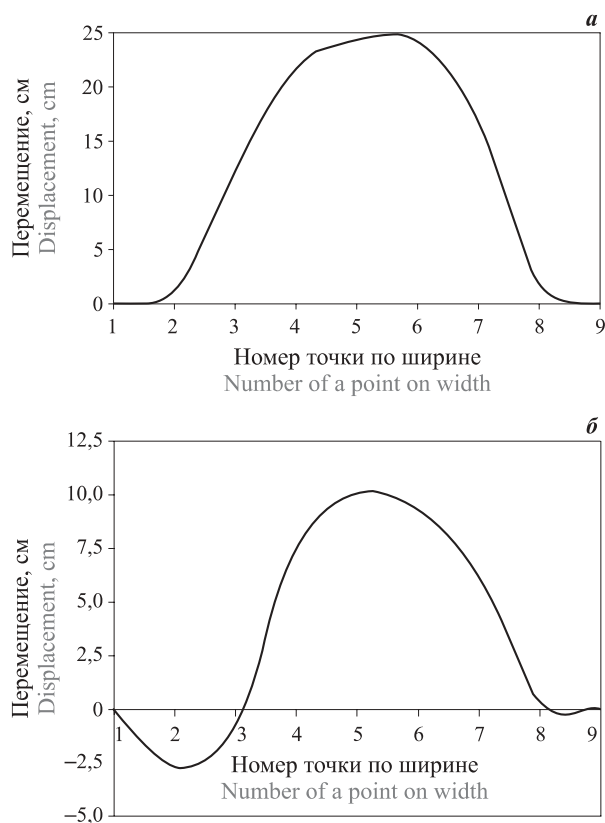


Рис. 7. Поле тепловых деформаций модели без покрытия (а) и с покрытием SGK-2 (б)

Fig. 7. The field thermal deformation of test plates without intumescent fire retardant coating (a) and with coating SGK-2 (b)

Методика определения температурного поля основана на применении следующих методов. Через рассмотрение теплового баланса элементарной двумерной области оболочки составляется уравнение теплопроводности, вид которого учитывает тип исследуемой зоны котла, а также характер внешнего теплового воздействия. Для интегрирования уравнения теплопроводности применяли вариационный метод. Был выбран соответствующий функционал, для которого данное уравнение является уравнением Эйлера. Далее в расчете использовали метод конечных элементов с применением треугольных плоских конечных элементов с линейной аппроксимацией температурного поля. Интегрирование разрешающей системы уравнений по времени проводили при помощи интерполяционного метода Адамса второго порядка.

Методика определения напряженно-деформированного состояния котла в очаге пламени основана на применении моментной теории оболочек и вариационного метода в виде принципа Лагранжа. Неравномерное температурное поле котла вызывает в нем тепловые деформации, которые учитываются в потенциальной энергии деформации. В результате этого в правой части разрешающей системы уравнений появляется вектор внешних тепловых воздей-

ствий. Расчет строится на основе метода конечных элементов. Для оболочки котла приняты конечные элементы в виде оболочечных отсеков в форме усеченных конусов, с аппроксимацией перемещений в виде рядов Фурье по окружной координате и полиномов от продольной координаты. Влияние повышения температуры оболочки котла на ее механические свойства учитывается путем задания переменного модуля упругости, зависящего от температуры.

Разработанные методики реализованы в виде пакета программ для ПЭВМ, написанных на языке Си++. С помощью данных программных средств были выполнены расчеты котла цистерны на аварийное воздействие открытого пламени. На рис. 8 приведены результаты сравнения температур, полученных расчетным путем, с данными модельного эксперимента.

На рис. 9 показано деформированное состояние котла-цистерны в очаге пламени, полученное расчетным путем с применением разработанной методики. Для сравнения качественной картины деформации на рис. 10 приведена фотография последствий нахождения котла цистерны в очаге пламени.

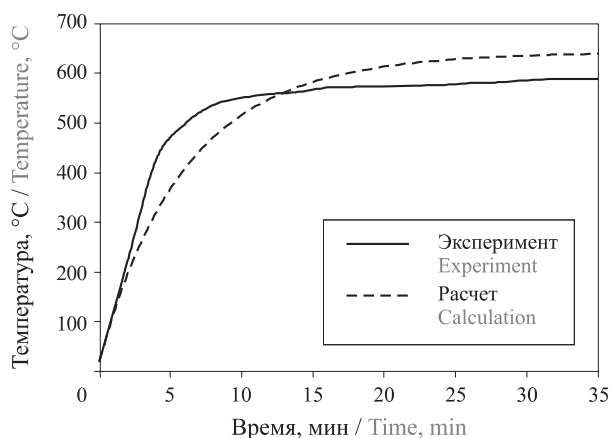


Рис. 8. Зависимость температуры оболочки котла-цистерны в центре очага пламени от времени

Fig. 8. Dependence of temperature test plates of railway tank in the center of the hearth flame on time

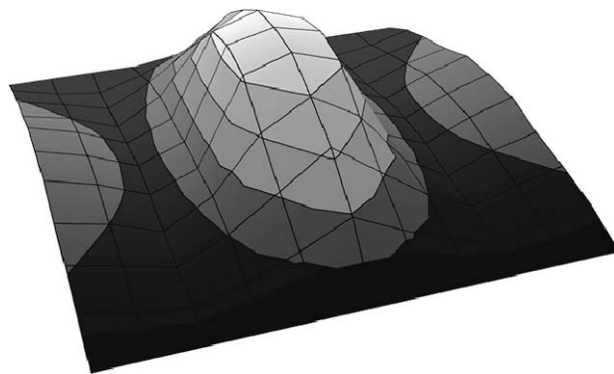


Рис. 9. Деформация оболочки котла цистерны в очаге пламени

Fig. 9. Deformation of the shell of railway tank in the hearth flame



**Рис. 10.** Последствия нахождения котла-цистерны в очаге пламени

**Fig. 10.** The consequences of a finding railway tank in the hearth flame

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

С учетом совокупности полученных экспериментальных данных и рассмотрения проблемы с теоретической точки зрения предложен комбинированный способ противопожарной защиты баллонов с СУГ, в частности вагонов-цистерн с СУГ.

Предлагаемый авторами способ позволяет радикально устранить возможность взрыва вагонов-цистерн с СУГ при попадании в очаг горения. На основании данных авторов настоящей статьи и других исследователей [17–19, 27] по способам и устройствам, позволяющим увеличить время пребывания баллонов в очаге пожара до их разрушения, предложено и реализовано комбинирование действий огнезащитного покрытия (теплоизоляционного пакета) и предохранительного клапана. Проведенные серийные испытания показали высокую эффективность предложенного подхода.

Результаты систематических исследований динамики изменения давления и температуры стенок моделей резервуаров с СУГ в очаге пожара показали, что эффективным средством увеличения времени пребывания в нем является покрытие их огнезащитным составом. В качестве такового предложен и испытан состав огнезащитный вспенивающийся СГК-1, показавший высокую эффективность и хорошо согласующийся с прогнозом. Данное решение весьма эффективно для объектов транспорта в силу ограниченных массогабаритных параметров.

Разработана методика экспериментальных исследований, позволяющая оценить основные характеристики поведения моделей резервуаров с СУГ в очаге пожара и определить наиболее эффективное огнезащитное покрытие.

Сформулированы технические требования к огнезащитным покрытиям в целях выбора наиболее эффективного покрытия.

Появление современных технических средств защиты и выпуск более 400 новых моделей цистерн требуют учета изменения конструкции вагонов в комплексе нормативно-технической документации [28]. В частности, назрела необходимость переработки справочника специализированных цистерн.

Одновременно с этим необходимо внесение корректив в альбом-справочник “Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм”. 002И-2009 ПКБ ЦВ (М. : ПКБ ЦВ, 2009. — 804 с.), который содержит только общие виды и параметры вагонов без описания арматуры и условий эксплуатации. Отсутствуют там и криогенные цистерны. Назрела также необходимость в переработке и документа “Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам” (утв. приказом МЧС РФ от 31.10.1996 № 9-733/3-2 и МПС РФ от 25.11.1996 № ЦМ-407).

Наконец, требует переработки и документ “Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм. Руководство по деповскому ремонту” (протокол 54 заседания Совета по железнодорожному транспорту от 19.05.2011) с учетом новых технических средств и технологий, в частности сливноналивных приборов с тремя степенями защиты, точечных средств налива.

### Выводы

1. Проведены масштабные экспериментальные и теоретические исследования поведения котлов железнодорожных цистерн в очаге пламени.
2. Смоделированы основные сценарии аварийных режимов, связанных с воздействием на котлы открытого пламени.
3. Разработаны и испытаны средства защиты котлов цистерн от пожара.
4. Проведенные исследования показали высокую эффективность таких технических средств защиты котлов, как предохранительные клапаны и огнезащитные покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Пер. с англ. — М. : Мир, 1989. — 672 с.
2. Davenport J. A. Hazards and protection of pressure storage and transport of LP-gas // Journal of Hazardous Materials. — 1988. — Vol. 20. — P. 3–19. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87003-1.
3. Стручалин В. Г., Пономарев В. М., Навценя В. Ю. Анализ взрывоопасных зон при заполнении цистерн нефтегрузами // Мир транспорта. — 2014. — Т. 12, № 3(52). — С. 184–191.

4. Петров И. И. Обеспечение пожарной безопасности резервуарных парков для хранения нефти, нефтепродуктов и сжиженных углеводородных газов (полувековой опыт научных исследований) // Пожарная безопасность. — 2010. — № 1. — С. 108–119.
5. Леончук П. А. Обзор научных работ по пожарной опасности транспортировки опасных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом в части оценки последствий аварий и пожарного риска // Пожарная безопасность. — 2017. — № 1. — С. 85–95.
6. Малов Е. А., Диенов И. Н., Митрофанов А. В. Разрушение пропанового баллона в частном доме с. Дедуровка Оренбургской обл. // Безопасность труда в промышленности. — 1996. — № 10. — С. 13–18.
7. Schoen W., Probst U., Droste B. Experimental investigation of fire protection measures for LPG storage tanks // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. — Norway, Oslo, 1989. — Vol. II. — P. 51/1–51/17.
8. Roberts A. F., Moodie K. The role of insulating coatings in the fire protection of LPG vessels // Journal of Oil and Colour Chemical Association. — 1989. — Vol. 72, No. 5. — P. 192–195.
9. Kletz T. Protect pressure vessels from fire // Hydrocarbon Processing. — 1977. — Vol. 56, No. 8. — P. 98–102.
10. Schoen W., Droste B. Brandschutz bei Flüssiggas-Lagertanks // TUE. — 1988. — Vol. 29, No. 4. — P. 115–119 (in German).
11. Birk A. M. Modelling the response of tankers exposed to external fire impingement // Journal of Hazardous Materials. — 1988. — Vol. 20. — P. 197–225. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87013-4.
12. Droste B., Schoen W. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks // Journal of Hazardous Materials. — 1988. — Vol. 20. — P. 41–53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87005-5.
13. Moodie K. Experiments and modelling: an overview with particular reference to fire engulfment // Journal of Hazardous Materials. — 1988. — Vol. 20. — P. 149–175. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87011-0.
14. Шевцов С. А., Каргашилов Д. В., Хабибов М. У. Особенности проектирования резервуарных установок сжиженных углеводородных газов в системах автономного газоснабжения с учетом оценки пожарного риска // Пожарная безопасность. — 2016. — № 3. — С. 150–155.
15. Шебеко Ю. Н., Шебеко А. Ю., Гордиенко Д. М., Леончук П. А., Сулименко В. А. Пожарный риск перевозки сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом // Пожарная безопасность. — 2016. — № 1. — С. 43–49.
16. Шебеко Ю. Н., Шебеко А. Ю., Гордиенко Д. М., Леончук П. А. Расчетная оценка пожарного риска перевозки сжиженных углеводородных газов автомобильным транспортом // Пожарная безопасность. — 2014. — № 4. — С. 26–33.
17. Страхов В. Л., Заикин С. В. Средства пассивной огнезащиты технологического оборудования объектов хранения и потребления сжиженного углеводородного газа на АГЗС // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2009. — № 5(47). — С. 3–9.
18. Крутов А. М., Страхов В. Л., Заикин С. В. Новые средства огневой защиты технологического оборудования автогазозаправочного комплекса // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2008. — № 1(37). — С. 51–53.
19. Заикин С. В., Страхов В. Л., Каледин В. О. Новый способ и средства огнезащиты для объектов нефтегазового комплекса // Транспорт на альтернативном топливе. — 2009. — № 4(10). — С. 28–32.
20. Барабанов А. А. Промышленный налив и слив сжиженных газов // Транспорт на альтернативном топливе. — 2013. — № 1(31). — С. 32–39.
21. Навценя В. Ю., Гордиенко Д. М., Смолин И. М., Болодьян И. А., Вогман Л. П., Карпов В. Л., Чибисов А. Л., Андреев В. А. Пожаровзрывобезопасность производственных объектов и транспортных систем // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 65–78.
22. Стручалин В. Г., Пономарев В. М., Навценя В. Ю. Возможность возникновения аварийных ситуаций при заполнении железнодорожных цистерн легковоспламеняющимися жидкостями // Наука и техника транспорта. — 2014. — № 4. — С. 85–90.
23. ТУ 7719-162-00000335–95. Состав огнезащитный вспенивающийся СГК-1. Технические условия. — М. : АО НПП Спецэнерготехника, 1995.
24. Навценя В. Ю., Стручалин В. Г., Ливанова Н. О., Филиппов Г. А. Влияние длительной эксплуатации и деформационного старения конструкционной стали 09Г2С на сопротивление разрушению и искрообразующую способность // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2015. — № 1. — С. 87–92.



25. 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. 63–72.
26. Беспалько С. В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2000. — 427 с.
27. Страхов В. Л., Заикин С. В. Расчет оптимальных параметров огнестойкого экрана противопожарных штор и укрытий // Транспорт на альтернативном топливе. — 2010. — № 3. — С. 20–24.
28. Рябцев Н. И., Кряжев Б. Г. Сжиженные углеводородные газы. — М. : Недра, 1977. — 279 с.

*Материал поступил в редакцию 10 октября 2017 г.*

**Для цитирования:** Филиппов В. Н., Шебеко Ю. Н., Пономарев В. М., Навценя В. Ю., Беспалько С. В., Плицына О. В. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 11. — С. 41–51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51.

English

## MODELING OF THE BEHAVIOR OF THE RAILWAY LPG TANK IN THE HEARTH FLAME

**FILIPPOV V. N.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Rail Cars and Car Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: Filipovvn@gmail.com)

**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 (VNIPO) (District VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: yn\_shebeko@mail.ru)

**PONOMAREV V. M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Management of Safety in a Technosphere Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: ponomarev.valentin@inbox.ru)

**NAVTSENYA V. Yu.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Management of Safety in Technosphere Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: VNavtsenya@rtrn.ru)

**BESPALCO S. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Rail Cars and Car Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: bespalco@yandex.ru)

**PLITSINA O. V.**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Management of Safety in a Technosphere Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: plitsa@yandex.ru)

### ABSTRACT

Practice shows that the depressurization of railway tank LPG is observed after 18 to 22 minutes from the moment of entering the fire burning, despite the fact that the walls of the vessels tank have a thickness of about 22–25 mm. The aim of this work was to study the behavior of the model of the vessels tank in the center of combustion by the action of powerful heat flow and the development of means of preventing its destruction.

As a rule, to ensure fire safety is used or the method of heat-and-fire protection or discharge gas from the vessel tank. However, of interest is the combination of these methods of fire safety for vessels with LPG.

The experimental investigations of various methods for fire protection of vessels with LPG (safety relief valves, intumescent fire retardant coatings, thermal isolation) have been executed. The experiments have been carried out, in order to investigate the behaviour of the vessels of volume of 50 dm<sup>3</sup> with LPG at the total fire engulfment. These vessels were equipped with the fire protection tools mentioned above. It has been found that the safety relief valves can prevent explosions of the vessels with LPG at their engulfment by the pool fire even without any other protective measures. The intumescent fire retardant coating or the thermal isolation reduce significantly a pressure rise rate and give the remarkable delay of the time moment when the safety relief valves begin to operate. A reasonably good agreement between the experimental and theoretical data was obtained. It has been revealed that the proposed fire protection tools are promising for prevention of explosions of LPG tanks at their engulfment by fires. Experimental and theoretical studies of the behavior of “non-wetting” shell of LPG tank. It is shown that the presence of the shell of the railway tank fire-retardant coatings can effectively reduce the influence of heat flux on the metal shell of the tank. Investigated experimentally and theoretically field thermal deformation of the metal plate without and with the application of intumescent fire protective coatings. Experiment on effects of heat flow on a metal plate simulated the thermal effect on the dry shell model rail cars. The results indicate the prospects of the considered methods of fire protection to prevent explosions of the LPG tanks fire, in particular, of boilers railway tank cars with LPG.

**Keywords:** railway LPG tank model; fire burning; fire protection methods; experimental testing; safety valve; intumescent fire retardant coatings; thermal deformation; thermal deformations fields.

## REFERENCES

1. Marshall V. C. *Major chemical hazards*. Chichester, Ellis Horwood Ltd., 1987 (Russ. ed.: Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv. Moscow, Mir Publ., 1989. 672 p.).
2. Davenport J. A. Hazards and protection of pressure storage and transport of LP-gas. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, vol. 20, pp. 3–19. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87003-1.
3. Struchalin V. G., Ponomarev V. M., Navtsenya V. Yu. Analysis of explosion hazardous areas while filling tank-wagons with oil cargoes. *Mir transporta / World of Transport and Transportation*, 2014, vol. 12, no. 3(52), pp. 184–191 (in Russian).
4. Petrov I. I. Fire safety of oil products and liquefied hydrocarbon gases tank farms (semi-centennial research experience). *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2010, no. 1, pp. 108–119 (in Russian).
5. Leonchuk P. A. Review of studies about fire hazard of dangerous cargo transportation by motor and railway transport in the part of assessment of accident consequences and fire risk. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2017, no. 1, pp. 85–95 (in Russian).
6. Malov E. A., Dienov I. N., Mitrofanov A. V. Destruction of vessel with propane in private house in village Dedurovka of the Orenburg region. *Bezopasnost truda v promyshlennosti / Occupational Safety in Industry*, 1996, no. 10, pp. 13–18 (in Russian).
7. Schoen W., Probst U., Droste B. Experimental investigation of fire protection measures for LPG storage tanks. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Norway, Oslo, 1989, vol. II, pp. 51/1–51/17.
8. Roberts A. F., Moodie K. The role of insulating coatings in the fire protection of LPG vessels. *Journal of Oil and Colour Chemical Association*, 1989, vol. 72, no. 5, pp. 192–195.
9. Kletz T. Protect pressure vessels from fire. *Hydrocarbon Processing*, 1977, vol. 56, no. 8, pp. 98–102.
10. Schoen W., Droste B. Brandschutz bei Flusiggas-Lagertanks. *TUE*, 1988, vol. 29, no. 4, pp. 115–119 (in German).
11. Birk A. M. Modelling the response of tankers exposed to external fire impingement. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, vol. 20, pp. 197–225. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87013-4.
12. Droste B., Schoen W. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, vol. 20, pp. 41–53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87005-5.
13. Moodie K. Experiments and modelling: an overview with particular reference to fire engulfment. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, vol. 20, pp. 149–175. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87011-0.
14. Shevtsov S. A., Kargashilov D. V., Habibov M. U. Design features of tank installations with liquefied hydrocarbon gases in the autonomous gas and energy supply systems considering fire risk assessment. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2016, no. 3, pp. 150–155 (in Russian).

15. Shebeko Yu. N., Shebeko A. Yu., Gordienko D. M., Leonchuk P. A., Sulimenko V. A. Fire risk of transportation of liquefied petroleum gas by railway transport. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2016, no. 1, pp. 43–49 (in Russian).
16. Shebeko Yu. N., Shebeko A. Yu., Gordienko D. M., Leonchuk P. A. An assessment of fire risk of petroleum gas trucking. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2014, no. 4, p. 26–33 (in Russian).
17. Strakhov V. L., Zaikin S. V. The technical means of passive fire protection for technological equipment of the objects of storage and consumption of liquid natural gas at Auto Gas Refueling Stations. *Avto-GazoZapravochnyy kompleks + Alternativnoye toplivo / AutoGas Filling Complex + Alternative Fuel*, 2009, no. 5(47), pp. 3–9 (in Russian).
18. Krutov A. M., Strakhov V. L., Zaikin S. V. The new means for passive fire protection of technological equipment of gas filling complex. *AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Alternativnoye toplivo / Auto-Gas Filling Complex + Alternative Fuel*, 2008, no. 1(37), pp. 51–53 (in Russian).
19. Zaikin S. V., Strakhov V. L., Kaledin V. O. The new method and means of fire protection for oil and gas complex. *Transport na alternativnom toplive / Alternative Fuel Transport*, 2009, no. 4(10), pp. 28–32 (in Russian).
20. Barabanov A. A. Industrial loading and unloading of liquefied gases is a reasonable approach. *Transport na alternativnom toplive / Alternative Fuel Transport*, 2013, no. 1(31), pp. 32–39 (in Russian).
21. Navzenya V. Yu., Gordienko D. M., Smolin I. M., Bolodian I. A., Vogman L. P., Karpov V. L., Chibisov A. L., Andreev V. A. Fire-and-explosion safety of industrial facilities and transport systems. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 65–78 (in Russian).
22. Struchalin V. G., Ponomaryov V. M., Navtsenya V. Yu. Possibility of emergency situations when filling railway tanks with flammable liquids. *Nauka i tekhnika transporta / Science and Technology in Transport*, 2014, no. 4, pp. 85–90 (in Russian).
23. *Fire retardant composition SGK-1*. Technical requirements, Moscow, Spetsenergotekhnika Publ., 1995 (in Russian).
24. Navtsenya V. Yu., Struchalin V. G., Livanova N. O., Filippov G. A. Influence of prolonged operation and strain aging of the 09Mn2Si structural steel on resistance to destruction and spark producing ability. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya / Problems of Ferrous Metallurgy and Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 87–92 (in Russian).
25. Shebeko Yu. N., Nazarenko V. A., Filippov V. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Zamyshvsky 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, p. 63–72 (in Russian).
26. Bepalko S. V. *Development and the analysis of models of the damaging impacts on coppers of tanks for transportation of cryogenic products*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, 2000. 427 p. (in Russian).
27. Strakhov V. L., Zaikin S. V. Optimal parameters calculation of fire-resistant shield for fire-prevention blind and shelters. *Transport na alternativnom toplive / Alternative Fuel Transport*, 2010, no. 3, pp. 20–24 (in Russian).
28. Ryabtsev N. I., Kryazhev B. G. *Szhizhennyye uglevodorodnyye gazy* [Liquefied petroleum gases]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 279 p. (in Russian).

**For citation:** Filippov V. N., Shebeko Yu. N., Ponomarev V. M., Navtsenya V. Yu., Bepalko S. V., Plitsina O. V. Modeling of the behavior of the railway LPG tank in the hearth flame. *Pozharovzryvo-bezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 11, pp. 41–51 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51.