

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 536-34; DOI: 10.61260/2304-0130-2024-2-26-32

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗЕРВУАРОВ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Романов Николай Николаевич;

Пермяков Алексей Александрович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Выделены негативные факторы в обеспечении безопасной эксплуатации резервуаров сжиженного природного газа, проявляющиеся при сжижении, выгрузке, приеме и регазификации продукта. Показана роль тепловых потерь в обеспечении безопасной эксплуатации резервуаров. Проанализированы методики в части учета возможного переменного теплового воздействия на наружную поверхность резервуара с сжиженным природным газом. Представлена методика теплового расчета изотермического резервуара, позволяющая учесть тепловую инерционность многослойной изоляции при воздействии теплового излучения пожара переменной интенсивности.

Ключевые слова: изотермический резервуар, сжиженный природный газ, тепловая изоляция, тепловая инерция

Для цитирования: Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. О влиянии теплоинерционных свойств изоляционных материалов резервуаров сжиженного природного газа в расчете тепловых потерь // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2024. № 2. С. 26–32. DOI: 10.61260/2304-0130-2024-1-26-32.

Введение

В существующих экономических условиях наблюдается рост динамики применения сжиженного природного газа (СПГ), из чего следует диверсификация мирового рынка энергоносителей, что расширяет возможности решения проблем снабжения газом удаленных и труднодоступных районов нашей страны. В Российской Федерации в настоящее время уже работают заводы по сжижению природного газа на острове Сахалин и полуострове Ямал, идет проектирование таких комплексов для освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения. Обязательной и необходимой частью промышленных и логистических комплексов, предназначенных для сжижения, выгрузки, приема и регазификации СПГ, становятся крупногабаритные надземные резервуары [1].

Процесс хранения СПГ является наиболее важным элементом завода СПГ и терминала, осуществляющего его перегрузку. Подобные сооружения размещаются на значительных площадях и считаются потенциальным источником производственных рисков. СПГ перекачивается с установок сжижения в резервуары или танкеры по продуктовым трубопроводам при помощи специальным насосов. Хранение СПГ обычно осуществляется при температуре $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ и незначительном избыточном давлении. Наиболее распространенным является изотермический способ хранения, который осуществляется при избыточном давлении в диапазоне $4,9\div 6,8$ кПа и температуре кипения СПГ, соответствующей значению абсолютного давления. Примерная конструкция надземного резервуара изотермического хранения СПГ представлена на рис. 1.

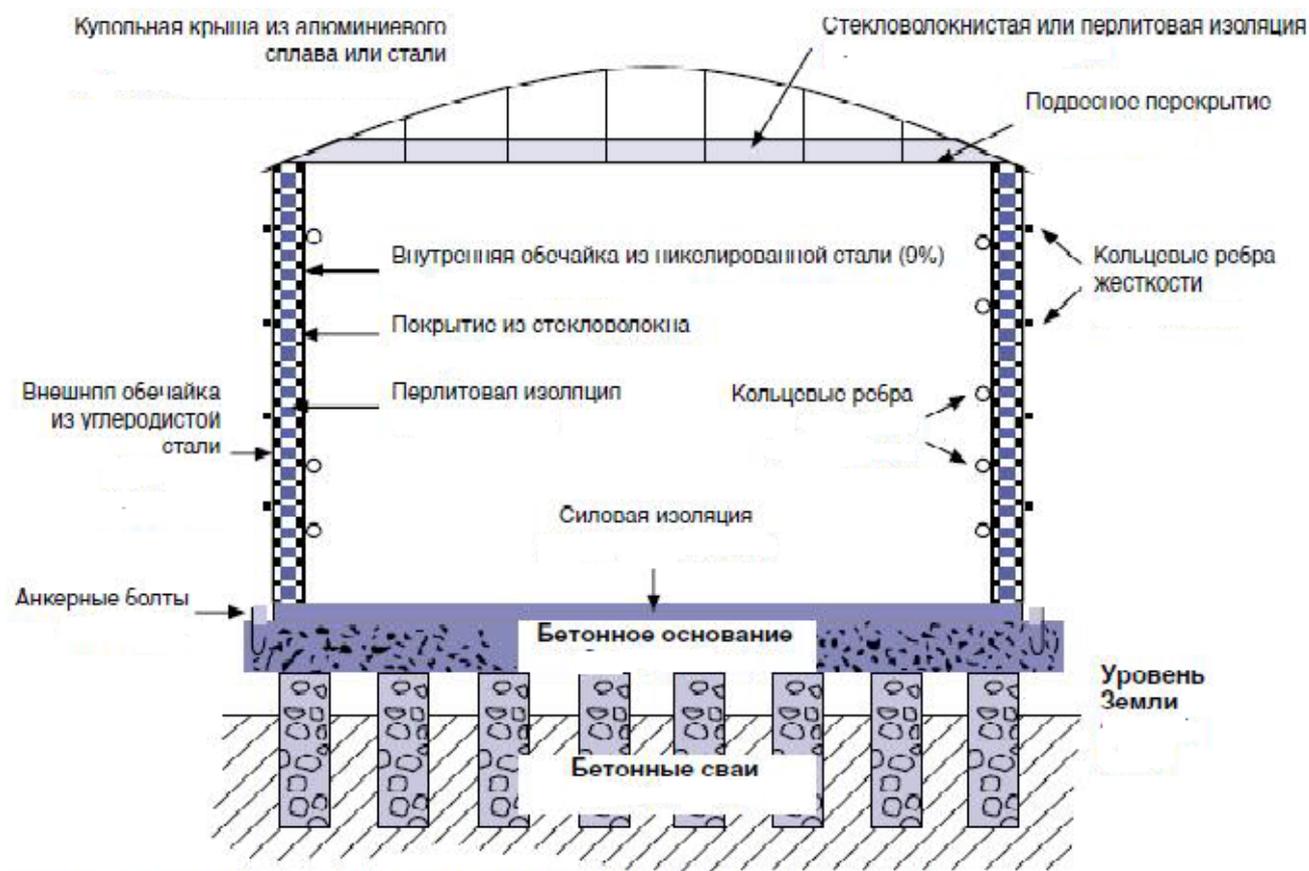


Рис. 1. Примерная конструкция надземного резервуара изотермического хранения СПГ

Основная часть

Существующий отечественный и мировой опыт показывает, что на объектах топливно-энергетического комплекса, связанных с транспортировкой СПГ, в результате аварий, связанных с нарушением теплового режима эксплуатации резервуаров, ежегодно гибнет несколько сотен человек [2].

Существует также проблема потерь СПГ при его хранении в резервуарах, тесно связанная с обеспечением их безопасной эксплуатации. Так, по информации компании KOGAS-Tech (36 действующих резервуаров), при эксплуатации типового резервуара полезного объема 200 000 м³ допустимые нормативные потери метана за сутки равны 0,05 %, что составляет 100 м³ утечки СПГ за счет внешнего теплового воздействия [3].

Значение удельной массовой среднесуточной скорости испарения сжиженного метана определяется уравнением:

$$m = \frac{M_n}{F \cdot \tau},$$

где M_n – норма массовых потерь за сутки; F – площадь свободной поверхности СПГ в резервуаре; τ – время испарения СПГ.

После несложных вычислений определяется значение удельной массовой

среднесуточной скорости испарения сжиженного метана $m=0,1 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Это предполагает, что при соблюдении изотермических условий, когда температуры жидкой фазы метана и его насыщенных паров равны и составляют примерно $164 \text{ }^\circ\text{C}$, а избыточное давление таких паров не превышает 10 кПа , с единицы свободной поверхности за секунду испаряется около $0,1 \text{ г}$ метана. Однако нарушение условия изотермичности, в том числе и вследствие внешнего теплового воздействия, резко изменяет всю термодинамику процесса газификации жидкой фракции СПГ, что может привести к аварийному истечению газовой фракции СПГ в окружающее пространство с последующим образованием пожаровзрывоопасной смеси [4]. Таким образом, одним из необходимых условий соблюдения условий безопасной эксплуатации резервуаров СПГ при внешнем переменном тепловым воздействием является поддержание его изотермичности, что включает в себя, в том числе, и создание эффективной теплоизоляции наружной поверхности.

По конструкции изотермические резервуары обычно представляет собой тонкостенные цилиндрические сосуды значительной вместимости, изолируемые снаружи разнообразными материалами с коэффициентом теплопроводности $\lambda < 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, таких как минеральный войлок, стекловолокно, вспененные полимерные материалы.

Современная классификация предполагает разделение резервуаров СПГ на следующие основные типы:

- одинарный резервуар, состоящий из внутренней низкотемпературной емкости и наружного кожуха, так называемого *singlecontainment tank*;
- двойной резервуар, имеющий конструкцию, аналогичную одинарному, и изготовленный из материала, сохраняющего конструкционные свойства при низких температурах, так называемого *doublecontainment tank*;
- резервуар с полной герметизацией, который является дальнейшим развитием конструкции двойного резервуара с возможностью вентиляции межблочного пространства и контроля концентрации паров СПГ, так называемого *fullcontainment tank*;
- резервуар мембранного типа, у которого низкотемпературная емкость изготавливается из гофрированных пластин относительно небольшой толщины [3].

Анализ используемых конструктивных решений в резервуарах больших объемов и хода тепловых процессов, протекающих при их эксплуатации, позволил выделить определенные негативные факторы, проявляющиеся при сжижении, выгрузке, приеме и регазификации СПГ:

- возможная временная зависимость теплофизических свойств материалов, используемых в слоях засыпной изоляции;
- недопустимые деформации конструктивных элементов резервуара в процессе стратификации или переворачивания слоев жидкой фракции СПГ;
- потеря герметичности наружного кожуха резервуара с последующим воспламенением образующейся пожаровзрывоопасной смеси продукта и воздуха [5].

В качестве теплоизоляционного материала, заполняющего межстенное пространство двойных резервуаров, часто используется перлит, имеющий нежелательную особенность уплотнения с последующим ростом величины коэффициента теплопроводности λ . Это явление способствует повышению притока тепла из окружающей резервуар среды, что и приводит к увеличению интенсивности испарения СПГ [6].

Поскольку практически все теплоизоляционные материалы имеют конечную паропроницаемость, в ходе эксплуатации изотермических резервуаров СПГ выявлена проблема повышения влажности таких материалов вследствие процесса конденсации, что интенсифицирует коррозионные процессы и ухудшает теплоизолирующие свойства материала. По мере конденсации влаги относительно незначительная величина коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала ($\lambda < 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$) приближается к значению коэффициента теплопроводности льда ($\lambda \approx 2,22 \div 3,48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$), что существенно ухудшает эксплуатационные параметры изотермических резервуаров СПГ.

Решение подобных проблем лежит в русле применения новых материалов. Одним из таких материалов может быть пеностекло, которое является ячеистым материалом, изготавливаемым из стекла при вспенивании углекислого газа, образующегося в процессе сгорания мелкодисперсного угольного порошка. Пеностекло является материалом негорючим, обладающим влаготалкивающей способностью и расширенным температурным диапазоном его использования ($-260\text{ }^{\circ}\text{C} \div +430\text{ }^{\circ}\text{C}$), однако значения плотности ($\rho \approx 120 \div 140\text{ кг/м}^3$) и удельной теплоемкости ($c_p \approx 0,84\text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$) этого материала предопределяют необходимость учета его теплоинерционных свойств [7].

Преодоление всех перечисленных факторов в той или иной части предполагает использование эффективной методики расчета теплоизоляции резервуара СПГ, которая бы учитывала возможные переменные тепловые воздействия на наружную поверхность резервуара с СПГ, среди которых можно выделить несколько наиболее распространенных.

Методика А.М. Архарова основана на представлении теплоизоляционного слоя как многослойной плоской тонкой стенки, что позволяет пренебречь концевыми тепловыми эффектами при определении величины тепловых потерь Q [4]:

$$Q = F_m \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_c - t_x),$$

где λ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя резервуара; δ – толщина теплопроводящего слоя резервуара; t_c и t_x – температуры окружающей среды и температура СПГ в холодной полости резервуара соответственно; $F_m = (F_c \cdot F_x)^{0,5}$ – средняя эффективная площадь теплоотдающей поверхности резервуара; F_c и F_x – площади наружной и холодной поверхности теплоизоляции резервуара соответственно.

Методикой М.Г. Каганера предполагается определение величины теплового потока через изоляцию резервуара теми же уравнениями теплопереноса теплопроводностью. Если применяется вакуумно-порошковая или вакуумно-многослойная структура теплоизоляции, то для определения тепловых потерь используются уравнения, основанные на законе Ж.Б-Ж. Фурье для одномерных структур, а если площадь поперечного сечения теплоизоляционного слоя не постоянна, то применяют среднюю эффективную площадь теплоотдающей поверхности резервуара F_m [8]:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{\lambda \cdot F_m}{\delta_m} = \sum_{i=1}^n \frac{F_{m,i}}{\delta_i},$$

где n – число слоев теплоизоляции резервуара; $\Delta t = t_c - t_x$ – температурный перепад между греющей и холодной средой.

Методика, изложенная в трудах Р.Ф. Баррона (например, в работе [9]), в значительной степени повторяет основные положения методики А.М. Архарова, но используется показатель эффективности теплопроводности λ_m .

Однако большинство предлагаемых методик исходит из стабильности параметров внешнего теплового воздействия, что не представляется возможным обеспечить в случае действия достаточно ощутимого теплового излучения, являющегося следствием пожара на соседнем объекте.

Возможным перспективным направлением в повышении теплоотражающих свойств поверхностей резервуаров СПГ является установка специального слоя, который способен отразить часть падающего на него излученного потока тепла. При решении подобного рода задач обычно применяют дополнительные экраны из алюминиевой фольги, покрытия из различных лакокрасочных композиций, а также покрытия, в основе которых лежат полимеры, стеклянные или керамические микросферы.

Необходимо сформировать методику описания теплоизолирующих свойств поверхностей резервуаров СПГ с учетом воздействия теплового излучения пожара, характеризующегося переменной интенсивностью.

Предположим, что изменения интенсивности падающего на поверхность резервуара теплового излучения пожара носят периодический характер, тем более что аппарат преобразований Ж.Б-Ж. Фурье позволяет выделить гармонический ряд. В этом случае закон теплопроводности приобретает вид:

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_n = \lambda \cdot k \cdot \sqrt{2} \cdot \vartheta_n^{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \frac{\pi}{4}\right), \quad (1)$$

где ϑ_n^{\max} – наибольшее отклонение температуры наружной поверхности резервуара от своего среднего значения, то есть амплитуда температурных колебаний; τ – продолжительность теплового воздействия пожара на наружную поверхность резервуара; ω – круговая частота температурных колебаний на наружной поверхности резервуара; a – коэффициент температуропроводности теплоизоляционного материала; $k=(\omega/2a)^{0,5}$ – коэффициент, учитывающий аккумулирующие свойства материала теплоизоляции резервуара.

Учитывая, что теплоизоляционные материалы, используемые в конструкции резервуаров СПГ, выбираются исходя из наличия относительно небольшого коэффициента теплопроводности, в работе [10] уравнение (1) предложено несколько упростить:

$$q_{n,\tau} = B \cdot \sqrt{2} \cdot \vartheta_n^{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \frac{\pi}{4}\right), \quad (2)$$

где B – коэффициент теплоусвоения, характеризующий аккумулирующие свойства теплоизоляционного материала, значение которого определяется этими свойствами в соответствии с уравнением (3):

$$B = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot \omega} = c_p \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sqrt{a \cdot \omega}, \quad (3)$$

где c_p – изобарная теплоемкость изоляционного материала стенки резервуара; ρ – плотность изоляционного материала стенки резервуара.

Исходя из уравнений (2) и (3), наибольшее значение плотности теплового потока q_n^{\max} и амплитуды колебаний отклонения температуры на поверхности теплоотражательного слоя стенки резервуара $\vartheta_n(\tau)$ связаны уравнением:

$$q_n^{\max} = c_p \cdot \rho \cdot \vartheta_n(\tau) \cdot \sqrt{a \cdot \omega}.$$

Фрагмент алгоритма теплового расчета изотермического резервуара СПГ, учитывающий эффект теплоусвоения теплоизоляционного слоя в условиях периодического внешнего теплового воздействия, изображен на рис. 2.

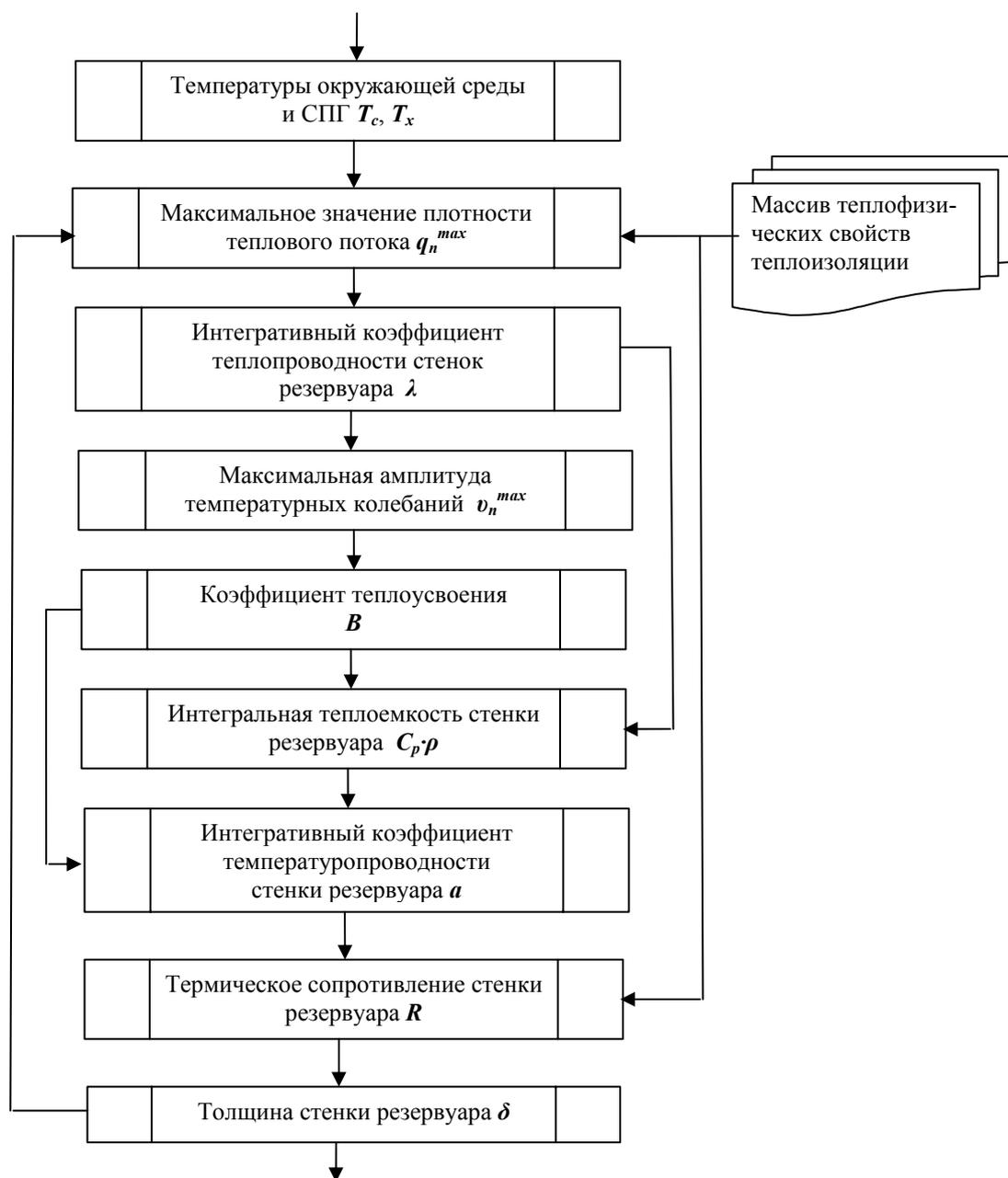


Рис. 2. Фрагмент алгоритма теплового расчета изотермического резервуара СПГ

Таким образом, предлагаемая методика теплового расчета изотермического резервуара СПГ позволяет учесть тепловую инерционность многослойной изоляции при воздействии теплового излучения пожара переменной интенсивности.

Список источников

1. Поповский Б.В., Майлер А.З. Строительство изотермических резервуаров. М.: Недра, 1988. 120 с.
2. Ханухов Х.М. Анализ причин аварий резервуаров, проектное, нормативное и техническое обеспечение их безопасной эксплуатации // Новые решения конструкций, технологии сооружения и ремонта стальных резервуаров: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. НЕФТЕГАЗМАШ. Самара; Н. Новгород, 2017. С. 112–120.
3. Sheila Crisologo. LNG Facilities. Dräger Safety AG & Co. KGaA. 2010.
4. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Теория и расчёт криогенных систем: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1978. 450 с.

5. Резервуары для хранения сжиженного газа. URL: <http://lngas.ru/lng-storage/rezervuary-xranenie-spg.html> (дата обращения: 05.09.2019).
6. Рахманин А.И., Иванцова С.Г. Исследование теплового режима двустенных изотермических резервуаров с нарушенной тепловой изоляцией // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2012. № 2 (30). С. 30–34.
7. Китаев С.В., Смородова О.В. Математическое моделирование испарения сжиженных углеводородов при нарушении тепловой изоляции резервуара // Нефтегазовое дело. 2017. № 1. С. 108–120.
8. Каганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных конструкциях. М.: Энергия, 1979. 256 с.
9. Баррон Р.Ф. Криогенные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989. 480 с.
10. Умнякова Н.П. Расчётный метод определения температуры на поверхности ограждений с учётом коэффициента излучения // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. С. 305–307.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 26.02.2024; принята к публикации: 29.04.2024

Информация об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313

Пермяков Алексей Александрович, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: ftoorpb@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN-код: 5444-3350