

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 67–82  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):67-82

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.842

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82>

## Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа

Михаил Владимирович Алешков<sup>1</sup>, Виктор Павлович Молчанов<sup>2</sup>,  
Сергей Александрович Макаров<sup>1</sup> ✉, Дмитрий Александрович Иощенко<sup>1</sup>,  
Алексей Владимирович Третьяков<sup>3</sup>, Владимир Вадимович Барешкин<sup>3</sup>,  
Рашид Борисович Битуев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Международный противопожарный центр, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> ЭГИДА ПТВ, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа является одним из наиболее оптимальных способов предотвращения дальнейшей эскалации аварии. При этом данных для нормирования основных параметров ее подачи недостаточно.

Цель работы заключается в обосновании применения воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа с определением основных параметров ее подачи. Для ее достижения ставятся задачи:

- оценка пожаровзрывоопасных свойств сжиженного природного газа и анализ средств тушения его проливов;
- экспериментальное определение изолирующего действия пены различной кратности на поверхности криогенной жидкости;
- экспериментальное определение огнетушащей эффективности пены при ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа;
- экспериментальная проверка целесообразности совместного применения высокочастотной воздушно-механической пены с порошковыми средствами пожаротушения.

**Результаты и их обсуждение.** По итогам обсуждения результатов собственных экспериментов с учетом зарубежного и отечественного опыта проведения таких исследований выявлено, что для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа целесообразно применение пены кратностью от 300 до 500 единиц. Ликвидация пламенного горения при применении пен низкой и средней кратности не происходит. Для снижения интенсификации пламенного горения СПГ требуется подача высокочастотной пены с интенсивностью, превышающей 0,08 кг/(м<sup>2</sup>·с). Для ликвидации пламенного горения целесообразно установить интенсивность подачи высокочастотной пены на уровне 0,17 ± 0,01 кг/(м<sup>2</sup>·с). Применение порошковых средств пожаротушения целесообразно для ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа, поверхность которого уже покрыта пеной.

**Выводы.** На основе собственных экспериментальных данных, анализа литературных источников, с учетом известных свойств противопожарной пены обоснованы основные параметры ее подачи для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа.

**Ключевые слова:** тушение; изоляция; порошок; пенообразователь; тепловой поток

**Для цитирования:** Алешков М.В., Молчанов В.П., Макаров С.А., Иощенко Д.А., Третьяков А.В., Барешкин В.В., Битуев Р.Б. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 67–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82

✉ Макаров Сергей Александрович, e-mail: s17031975@rambler.ru

# Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills

Mikhail V. Aleshkov<sup>1</sup>, Viktor P. Molchanov<sup>2</sup>, Sergey A. Makarov<sup>1</sup>✉, Dmitriy A. Ioschenko<sup>1</sup>, Aleksey V. Tretyakov<sup>3</sup>, Vladimir V. Bareshkin<sup>3</sup>, Rashid B. Bituyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> International Fire Prevention Center, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> EGIDA PTV, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills is one of the most optimal methods of preventing the escalation of emergencies. However, the amount of data available today is insufficient to standardize the basic parameters of air-filled foam injection.

The purpose of this research project is to justify the application of air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas and identify the basic parameters of injection. The following objectives are to be attained towards this end:

- assessment of the fire and explosion safety of liquefied natural gas and analysis of extinguishing means applicable to spills;
- experimental determination of the insulating ability of foams, having different expansion factors, if applied to the surface of cryogenic fluid;
- experimental determination of the fire-fighting efficiency of the foam used to liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas;
- experimental verification of expediency of the joint application of high expansion air-filled foam and extinguishing powders.

**Results and discussion.** Having discussed the findings of the in-house experiments and analyzed the international and domestic tests conducted for this purpose, the authors assume that the application of the foam, whose expansion factor equals 300 to 500 units, can effectively contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas. The flaming combustion cannot be liquidated, if lower expansion factor foams are applied. The application rate of the high-expansion air-filled foam, exceeding 0.08 kg/(m<sup>2</sup>s), is required to reduce the intensity of flaming combustion. Flaming combustion can be efficiently liquidated if the application rate of high-expansion air-filled foam is set at 0.17 ± 0.01 kg/(m<sup>2</sup>s). Fire-extinguishing powders can only be efficiently applied to liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas, if its surface is covered in foam.

**Conclusions.** The authors have used their in-house experimental data, analyzed the literary sources and well-known properties of the fire-extinguishing foam to justify the basic parameters of foam application aimed at the containment and liquidation of the flaming combustion of liquefied natural gas.

**Keywords:** extinguishing; isolation; powder; foam generating agent; heat flow rate

**For citation:** Aleshkov M.V., Molchanov V.P., Makarov S.A., Ioschenko D.A., Tretyakov A.V., Bareshkin V.V., Bituyev R.B. Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):67-82. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82 (rus).

✉ Sergey Aleksandrovich Makarov, e-mail: s17031975@rambler.ru

## Введение

Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа является одним из наиболее оптимальных способов предотвращения дальнейшей эскалации аварии. В отличие от порошковых и газовых огнетушащих составов использование пены дает возможность реализовать как технологию тушения, так и технологию контролируемого выгорания сжиженного природного газа. При этом данных для нормирования основных параметров ее подачи недостаточно. В работе на основе собственных экспериментальных данных, анализа

литературных источников, с учетом известных свойств противопожарной пены обоснованы основные параметры ее подачи для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа.

Актуальность создания технологии тушения локальных проливов сжиженного природного газа (СПГ) не вызывает сомнений. С 2015 г. его производство в нашей стране выросло более чем в три раза. При этом до сих пор отсутствуют нормативные документы, регламентирующие выбор и расчет соответствующих огнетушащих веществ. В начале прошлого года утвержден план мероприятий

(дорожная карта) по развитию внутреннего рынка сжиженного природного газа в Российской Федерации. Строительство автозаправочных станций СПГ будет иметь массовый характер. В ближайшие два с половиной года их количество должно вырасти в восемь раз, а суммарная установленная мощность составит более 80 т в час<sup>1</sup>. Поэтому именно сейчас чрезвычайно остро стоит вопрос о разработке технологии локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа.

Первый свод правил по пожарной безопасности хранилищ СПГ — СП 240.1311500.2015 «Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности»<sup>2</sup> вступил в действие в 2015 г., а в 2017 г. принят свод правил СП 326.1311500.2017 «Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности»<sup>3</sup>. В настоящее время ведется разработка нормативных документов, связанных с вопросами пожарной безопасности бункеровки водного и железнодорожного транспорта [1, 2].

Несмотря на расширение соответствующей нормативной базы, предлагаемая в настоящее время тактика тушения сжиженного природного газа не выдерживает никакой критики, тем более, что к аварийной ситуации, сопровождающейся дальнейшим воспламенением СПГ, могут привести процессы, оказывающие влияние как на устойчивость функционирования, так и на конструктивную целостность резервуаров, сосудов, аппаратов и трубопроводов [3, 4].

Специалисты в России и за рубежом оценивают возможность возникновения пожаровзрывоопасных концентраций и делают предположение, что ликвидировать горение пролива сжиженного природного газа в отдельных случаях нецелесообразно, так как это может привести к загазованности территории объекта [5–12]. Эти опасения вошли и в действующие нормативные документы. В соответствии с принятыми сводами правил: «При загорании пролитого на поверхность земли СПГ рекомендуется дать возможность ему гореть под контролем, принимая меры к перекрытию доступа газа к очагу пожара. После прекращения доступа природного газа к очагу пожара следует приступить к ликвидации возможного вторичного пожара имеющимися средствами пожаротушения. В случае крупных аварий, когда невозможно

прекратить доступ газа к очагу возникшего пожара, нецелесообразно производить тушение горящего природного газа. В этом случае необходимо защищать окружающие объекты от непосредственного воздействия очага горения водяным орошением.

Использование воды для тушения пожаров проливов СПГ не допускается, поскольку поступление воды усиливает интенсивность испарения разлившегося СПГ и, как следствие, интенсивность его горения. Тушение горящего пролива СПГ следует проводить только тогда, когда горение может привести к каскадному развитию аварии, при этом должны быть приняты меры к контролю и борьбе с загазованностью. Наиболее эффективны для тушения пожаров небольших проливов СПГ порошковые средства пожаротушения»<sup>2, 3</sup>.

Таким образом, непонятно, что же нужно сделать первому РТП по прибытию к месту пожара. Приступать к тушению или нет? Если приступать к тушению, то чем? Стандарты на огнетушащие вещества и средства их подачи для тушения СПГ отсутствуют. При этом термины «имеющиеся средства пожаротушения» и «небольшие проливы СПГ» могут впоследствии быть истолкованы достаточно широко. По каким критериям первый РТП может понять, что горение не приведет к каскадному развитию аварии? Также непонятно, что необходимо предпринять, если часть поданной на орошение объекта воды попадает на место пролива СПГ и интенсифицирует горение. Если прекратить охлаждение, тогда воздействие тепла от очага пожара приведет к разрушению объекта защиты. Тогда единственным вариантом предотвращения эскалации является только тушение. И обойтись здесь порошковыми огнетушителями представляется возможным только в том случае, если их использование персоналом объекта произойдет в начальной стадии пожара. Тем более, что данные по нормативным значениям требуемого удельного расхода порошка и интенсивности его подачи также отсутствуют. Поэтому пожарным подразделениям нужно предложить конкретные варианты выполнения своей боевой задачи с применением стандартизованных огнетушащих веществ и стандартизованных средств их подачи.

<sup>1</sup> Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.02.2021 № 350-р.

<sup>2</sup> СП 240.1311500.2015. Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности.

<sup>3</sup> СП 326.1311500.2017. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности.

Рассмотрим, что же в этом направлении уже сделано за рубежом. Так, например, из самого названия европейского стандарта DIN EN 12065<sup>4</sup> следует, что для тушения пожаров сжиженного природного газа предусматривается применение пены средней и высокой кратности, а также порошков. При этом огнетушащая эффективность пены оценивается возможностью локализации пожара, которая определяется по десятикратному снижению теплового излучения от горящего модельного очага площадью 50 м<sup>2</sup>.

То есть технология пенного пожаротушения предусматривает возможность локализации и дальнейшего контролируемого выгорания СПГ при одновременном снижении пламенного горения и теплового потока от него. Следует отметить, что использование пены в технологии контролируемого выгорания позволяет предотвратить загазованность территории объекта, чего нельзя достичь, применяя исключительно порошковые средства тушения. К сожалению, в рассмотренном европейском стандарте отсутствуют данные о конкретной величине требуемой интенсивности, а также о составе и показателях качества используемых пенообразователей и порошков для тушения пожаров сжиженного природного газа. Из текста документа следует, что использование порошка целесообразно либо для тушения небольших проливов СПГ, либо для дотушивания пролива, покрытого пенным слоем. На наш взгляд, именно такая позиция в организации тушения СПГ является наиболее оптимальной и перспективной.

Несмотря на то, что газовые и порошковые огнетушащие составы позиционируются как основные средства тушения горючих газов [12–14], в рассмотренном европейском стандарте указывается, что эффективность порошков подтверждается только при ликвидации горения небольших проливов СПГ, а газовые огнетушащие составы не рассматриваются вообще.

Ветер и конвективные потоки, возникающие при пламенном горении сжиженного природного газа, не позволяют создать требуемую огнетушащую концентрацию в очаге горения. Высота пламени также играет свою отрицательную роль в реализации порошкового и газового пожаротушения сжиженного природного газа. В свою очередь основное или дополнительное применение воздушно-механической пены может решить вопросы, освещаемые в разработанных отечественных сводах правил, а именно: снизить тепловое излучение от очага пожара, обеспечить контролируемое выгорание СПГ, предотвратить загазованность

территории и, в случае необходимости, ликвидировать горение.

Так какая же воздушно-механическая пена наиболее эффективна для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа? Пена низкой, средней или высокой кратности? Какой тип пенообразователя следует применить и какие у него должны быть основные технические характеристики? Достаточно значимое количество работ по пенному тушению проливов СПГ и СУГ выполнено И.М. Абдурагимовым и Г.Н. Куприным на базе «НПО Сопот». Авторы предполагают, что при всех сценариях развития аварийной ситуации, обусловленной проливом либо истечением СПГ или СУГ (кроме варианта внезапного взрыва газозавоздушной смеси в момент истечения флюида), наиболее перспективными и целесообразными представляются попытки управления развитием аварийной ситуации с использованием комбинированных пен низкой или средней кратности. Взрывоопасные концентрации газа ликвидируются воздушно-механической пеной низкой и средней кратности из раствора синтетического углеводородного пенообразователя путем образования на поверхности СУГ и СПГ слоя пены, состоящего из тонкого, неравномерно распределенного слоя льда, к которому «прикрепляется» слой замороженной пены, над которым расположен слой мокрой незамороженной пены [15]. Исследователями также предложен способ оценки свойств противопожарной пены с использованием в качестве криогенной жидкости сжиженного азота. Несмотря на большое количество проведенных опытов, в результатах работ отсутствуют данные о требуемой интенсивности подачи пены и требуемом удельном расходе для локализации и ликвидации пламенного горения СПГ. Также следует отметить, что сжиженный метан и сжиженная пропан-бутановая смесь имеют разную температуру кипения и интенсивность испарения, а их пары — разную плотность, поэтому основные параметры пенного тушения СУГ и СПГ должны быть разными. И здесь мы опять возвращаемся к вопросу отсутствия конкретных данных об основных параметрах подачи пены для оценки возможности ее применения при тушении СПГ.

Для того чтобы разобраться со средствами тушения СПГ, нужно сначала понять, что мы тушим. Сжиженный природный газ — это горючий газ или горючая жидкость? Какой класс пожара присваивается горящему проливу СПГ? В дальнейших рассуждениях мы рассматриваем горение проливов сжиженного природного газа именно как горение

<sup>4</sup> DIN EN 12065. Европейский стандарт. Установки и оборудование для сжиженного природного газа. Испытания пенообразователей, предназначенных для получения пены средней и высокой кратности, а также огнетушащих порошков, для тушения пожаров сжиженного природного газа.



горючих жидкостей с применением соответствующих средств их тушения.

Итак, сжиженный природный газ или сокращенно СПГ. В соответствии с ГОСТ Р 57431–2017<sup>5</sup>, современный СПГ состоит в основном из метана. Мольная доля метана составляет от 87 до 99 %. В оставшуюся часть входят этан, пропан, бутан, пентан и азот. Плотность СПГ зависит от его компонентного состава и обычно колеблется в диапазоне от 430 до 470 кг/м<sup>3</sup>, но в отдельных случаях может достигать 520 кг/м<sup>3</sup>. Вязкость СПГ зависит от состава и температуры. Вязкость СПГ в 5–10 раз меньше вязкости воды. СПГ хранят в кипящем состоянии. Поскольку СПГ является многокомпонентной смесью, составы мгновенно испарившегося газа и оставшейся жидкости отличаются.

На рис. 1 представлена зависимость, характеризующая соответствие температурных и концентрационных пределов распространения пламени СПГ, содержащего 95 % мольных долей метана. У сжиженного природного газа с таким химическим составом нижним температурным пределом распространения пламени является температура –177 °С, которая всего лишь на 5 °С выше температуры застывания.

Верхний температурный предел распространения пламени соответствует температуре –173 °С, которая на 12 °С ниже температуры кипения. Сжиженный природный газ — это кипящая горючая жидкость, над поверхностью которой образуется паровоздушное облако с концентрацией паров выше верхнего температурного предела распространения пламени [1, 5, 16]. Скорость испарения СПГ зависит от материала поверхности, на кото-

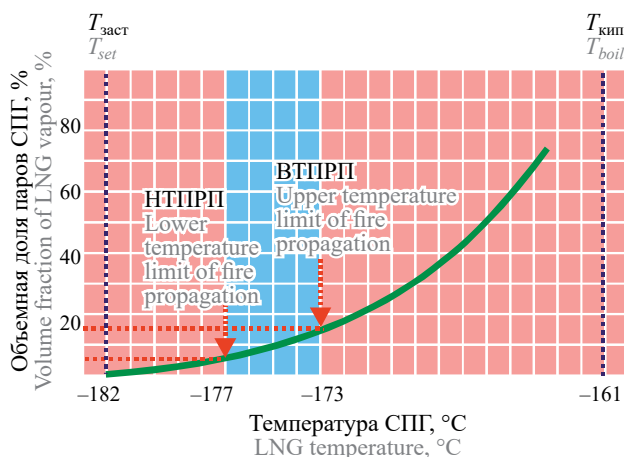


Рис. 1. Температурные пределы распространения пламени сжиженного природного газа

Fig. 1. The flame propagation temperature range of liquefied natural gas

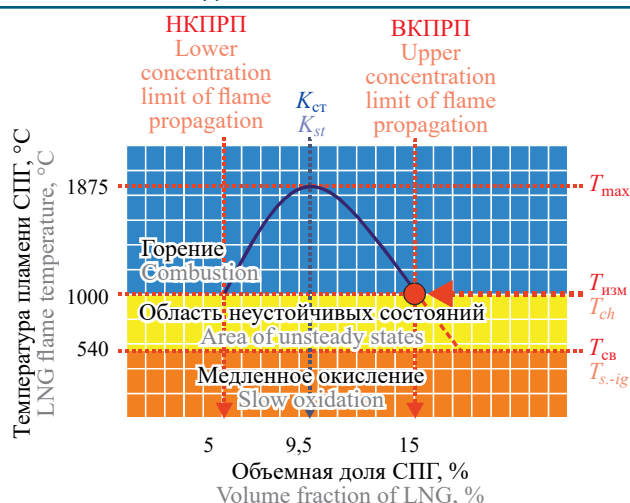


Рис. 2. Температура пламени сжиженного природного газа

Fig. 2. LNG flame temperature

рую произошел пролив. В соответствии с ГОСТ Р 57431–2017<sup>5</sup> наибольшее испарение СПГ происходит с поверхности воды, скорость испарения составляет 600 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Скорость испарения СПГ с поверхности, покрытой щебнем, составляет 480 кг/(м<sup>2</sup>·ч), а с поверхности обычного бетона — 130 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Этот фактор учитывался в дальнейших исследованиях при определении основных параметров тушения СПГ.

Как же горит испарившийся СПГ над поверхностью пролива? Он горит так же, как горит «богатая» паровоздушная смесь при недостатке воздуха. При температуре самовоспламенения паров СПГ 540 °С температура пламени находится в районе 1000 °С (рис. 2). Высота пламени горящего СПГ является одним из основных препятствий обеспечения требуемой огнетушащей концентрации газовых и порошковых огнетушащих соста-



Рис. 3. Горение СПГ в противне площадью 1 м<sup>2</sup>

Fig. 3. LNG combustion in a 1 m<sup>2</sup> tray

<sup>5</sup> ГОСТ Р 57431–2017. Газ природный сжиженный. Общие характеристики.

вов. При горении пролива СПГ на площади одного квадратного метра образуется пламя высотой более четырех метров (рис. 3).

Основным, а в отдельных случаях и единственным средством тушения, позволяющим снизить высоту пламени, является воздушно-механическая пена. Огнетушащее действие пены по классической теории основано на предотвращении доступа горючих паров и газов в зону горения и охлаждении поверхности горючей жидкости [17]. Однако, если воздушно-механическая пена применяется для ликвидации горения криогенной жидкости, то охлаждающего эффекта она не оказывает. Наоборот, чем меньше площадь пятна контакта «горячей» пены с криогенной жидкостью, тем меньше интенсификация ее испарения [1, 18]. Несмотря на это, противопожарная пена на поверхности сжиженного природного газа существенно снижает интенсив-

ность испарения и является основным средством локализации и ликвидации горения. Наилучшими противопожарными свойствами обладает пена высокой кратности, стабилизированная специальными добавками, повышающими ее устойчивость. Высокократную пену применяют как для локализации, так и для ликвидации пламенного горения проливов СПГ. Толщина пенного слоя является одним из основных критериев эффективности. При применении пены высокой кратности достигается наибольшая толщина пенного слоя [19–24].

## Результаты и их обсуждение

Для оценки изолирующего действия противопожарной пены низкой, средней и высокой кратности на поверхности СПГ проведены собственные исследования с использованием в качестве крио-



**Рис. 4.** Проведение исследований по определению изолирующего действия воздушно-механической пены на поверхности сжиженного азота: *a* — залив сжиженного азота в противень без цилиндрического ограждения; *b* — залив сжиженного азота в противень с цилиндрическим ограждением; *c* — выдержка сжиженного азота в противне без цилиндрического ограждения; *d* — выдержка сжиженного азота в противне с цилиндрическим ограждением; *e* — подача пены низкой кратности; *f* — подача пены средней кратности без принудительного наддува воздуха; *g* — подача пены средней кратности с принудительным наддувом воздуха; *h* — подача пены высокой кратности с принудительным наддувом воздуха; *i* — промерзшая пена низкой кратности на поверхности сжиженного азота через 60 с после прекращения подачи

**Fig. 4.** Testing the insulation ability of the air-filled foam on the surface of liquefied nitrogen: *a* — pouring liquefied nitrogen on a tray that has no cylinder-shaped enclosure; *b* — pouring liquefied nitrogen on a tray that has cylinder-shaped enclosure; *c* — conditioning of liquefied nitrogen on a tray that has no cylinder-shaped enclosure; *d* — conditioning of liquefied nitrogen on a tray that has cylinder-shaped enclosure; *e* — application of low expansion foam; *f* — application of medium expansion foam without boost air charging; *g* — application of medium expansion foam accompanied by boost air charging; *h* — application of high expansion foam accompanied by boost air charging; *i* — frozen low expansion foam on the surface of liquefied nitrogen 60 seconds after the termination of foam application

генной жидкости сжиженного азота (рис. 4). Пена приготавливалась на основе пенообразователей различных типов. Сущность методики заключается в определении величины интенсивности испарения сжиженного азота до и после покрытия его поверхности пеной. При проведении исследований использованы лабораторные пеногенераторы низкой, средней и высокой кратности. Расход рабочего раствора из пеногенераторов составлял  $30 \pm 3$  г/с. Получение пены низкой кратности производилось без принудительного наддува воздуха.

Получение пены средней кратности производилось как без принудительного наддува воздуха, так и с принудительным наддувом воздуха. Получение пены высокой кратности производилось только с принудительным наддувом воздуха. Для исследований изолирующей эффективности пены использовался металлический противень круглой формы диаметром 500 мм и высотой стенки 200 мм. При исследованиях пены средней и высокой кратности на противень устанавливалось цилиндрическое ограждение, высотой 500 мм, изготовленное из металлической сетки. Указанное ограждение не позволяло пене растекаться за границы стенок противня и обеспечивало нахождение пены непосредственно над поверхностью сжиженного азота. Сжиженный азот доставлялся к месту проведения работ в сосудах Дьюара объемом 50 л. Для удобства доставки и налива сжиженного азота в металлический противень использовалось передвижное опорно-поворотное устройство, позволяющее перевозить сосуд Дьюара и обеспечивать его расположение над противнем с необходимым углом наклона во время перелива азота в противень. Измерение массы испарившегося азота производилось на электронных весах с пределом взвешивания 41 кг, точностью 1 г с выводом и фиксацией результатов измерений на персональный компьютер в режиме реального времени. Поверхность грузоподъемной платформы весов для установки противня покрыта теплоизоляционным материалом. Исследования по определению изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости выполнялись в следующей последовательности. Металлический противень устанавливался на платформу весов, и производился перелив сжиженного азота из сосуда Дьюара в противень. Высота свободного борта составляла  $100 \pm 10$  мм. Время выдержки сжиженного азота в металлическом противне с момента окончания налива до начала подачи пены составляло  $65 \pm 5$  с. В течение этого времени стабилизировалась интенсивность испарения сжиженного азота, величина которой составляла  $0,06 \pm 0,01$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Затем поверхность сжиженного азота покрывалась воздушно-механической пеной и в течение 60 с, после пре-

ращения ее подачи, измерялась интенсивность испарения. Проникновение паров криогенной жидкости через пенный слой в режиме реального времени визуально наблюдали при помощи тепловизора с выводом на экран персонального компьютера.

По результатам измерений установлено, что величина интенсивности испарения с поверхности азота, покрытой пеной низкой кратности, находилась в диапазоне от 0,021 до 0,032 кг/(м<sup>2</sup>·с). Кратность пены составляла от 8 до 19 единиц. Величина интенсивности испарения с поверхности, покрытой пеной средней кратности, находилась в диапазоне от 0,008 до 0,015 кг/(м<sup>2</sup>·с). Кратность составляла от 42 до 125 единиц. Величина интенсивности испарения с поверхности, покрытой пеной высокой кратности, находилась в диапазоне от 0,0023 до 0,0044 кг/(м<sup>2</sup>·с). Кратность пены составляла от 212 до 535 единиц. В результате проведенных исследований на сжиженном азоте установлено, что кратность пены и тип пенообразователя играют существенную роль в изолирующем действии пен на поверхности криогенной жидкости. При этом пенообразователи с высокими показателями огнетушащей эффективности н-гептана и бензина не всегда показывают соответствующую изолирующую способность на поверхности криогенной жидкости. Наименьшее парообразование наблюдалось при покрытии поверхности криогенной жидкости пеной высокой кратности [1, 18]. Интересно поведение пены низкой кратности на поверхности сжиженного азота. Подача пены низкой кратности сначала интенсифицирует испарение криогенной жидкости, однако уже через 20–30 с нижние слои пены промерзают и газообразование существенно снижается, затем замерзшая воздушно-механическая пена низкой кратности погружается в сжиженный азот. Контакт пены средней и высокой кратности с криогенной жидкостью вызывает краткосрочное повышение интенсификации испарения с последующим существенным снижением и долгим изолирующим эффектом.

Выполненные исследования по определению изолирующего действия пены внесли некоторую ясность в вопросах, связанных с пенным пожаротушением криогенных жидкостей. Одно из главных существующих сомнений возможности применения пены было связано с большой разницей температур между рабочим раствором пенообразователя и СПГ, а также предположением, что подача пены существенно интенсифицирует кипение и может привести к мгновенному фазовому переходу из жидкости в газ. Несмотря на то, что температура кипения сжиженного азота на 35 °С ниже температуры кипения сжиженного природного газа, при проведении





**Рис. 5.** Доставка сжиженного природного газа к месту проведения испытаний: *a* — автомобильный криогенный топливный бак; *b* — сосуд Дьюара с сжиженным азотом и сосуд Дьюара для СПГ, установленный на передвижном опорно-поворотном устройстве; *c* — залив сжиженного азота для охлаждения сосуда Дьюара; *d* — слив сжиженного азота; *e* — заполнение сосуда Дьюара СПГ; *f* — охлаждение модельного противня сжиженным азотом; *g* — перевозка СПГ от криогенного топливного бака к модельному противню; *h* — наполнение противня площадью 1 м<sup>2</sup> СПГ из одного сосуда Дьюара; *i* — наполнение противня площадью 2 м<sup>2</sup> СПГ из двух сосудов Дьюара

**Fig. 5.** Delivery of liquefied natural gas to the testing site; *a* — car-mounted cryogenic fuel tank; *b* — Dewar's flask that has liquefied nitrogen and Dewar's flask for LNG on a mobile rotary support; *c* — pouring of liquefied nitrogen needed to cool the Dewar's flask; *d* — discharging of liquefied nitrogen; *e* — filling the Dewar's flask with LNG; *f* — using liquefied nitrogen to cool the standard tray; *g* — transporting LNG from the cryogenic fuel tank to the standard tray; *h* — filling the 1 m<sup>2</sup> tray with LNG from one Dewar's flask; *i* — filling the 2 m<sup>2</sup> tray with LNG from two Dewar's flasks

исследований подобные процессы не возникали. Экспериментальное определение изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости выявило, что при применении пены высокой кратности имеется возможность предотвращения испарения СПГ, необходимого для поддержания пламенного горения. Тем не менее окончательно убедиться в эффективности пенного пожаротушения сжиженного природного газа было возможно только после проведения соответствующих огневых тестов.

Большое количество работ при подготовке к огневым испытаниям было связано с оценкой характеристик используемого испытательного оборудования и поиском способа доставки сжиженного природного газа к месту проведения эксперимента. Определенные трудности возникали во время перевозки и налива СПГ в модельный противень (рис. 5).

Было решено, что оптимальный вариант доставки СПГ может быть реализован при помощи

сосудов Дьюара объемом 50 л, устанавливаемых на передвижных опорно-поворотных устройствах. При этом перед наливом СПГ в сосуды Дьюара и сливом в противень они должны быть предварительно охлаждены сжиженным азотом. Все это позволяло снизить испарение СПГ до его поджига. Заполнение сосудов Дьюара СПГ производилось из автомобильного криогенного топливного бака объемом 1 м<sup>3</sup>. Переливной клапан криогенного бака был заменен на патрубок с аналогичной резьбой. К патрубку присоединено наливочное устройство, представляющее собой теплоизолированный рукав длиной 1,5 м с трубкой длиной 0,5 м. Трубка должна засовываться в горловину сосуда Дьюара. Трубка заглушена на конце и имеет в нижней части шесть отверстий для слива СПГ. При проведении испытаний с модельными очагами площадью более 1 м<sup>2</sup> использовался не один, а два сосуда Дьюара с двумя передвижными опорно-поворотными устройствами.



При проведении огневых испытаний все действия операторов выполнялись строго по команде руководителя испытаний. Огневые испытания по тушению СПГ производились в следующей последовательности. Передвижные опорно-поворотные устройства с сосудами Дьюара устанавливаются около криобака на расстоянии, позволяющем полностью погрузить трубку наливного устройства в сосуд Дьюара. Производится охлаждение сосудов Дьюара сжиженным азотом. Для этого сжиженный азот заливается в сосуды Дьюара и сливается. Трубка наливного устройства вставляется в горловину сосуда Дьюара. Открывается запорный клапан криобака. После начала разбрызгивания каплей СПГ из горловины сосуда Дьюара трубка наливного устройства поднимается на высоту 0,1 м. После очередного разбрызгивания каплей СПГ трубка наливного устройства поднимается еще на 0,1 м. Данная операция повторяется 3 раза до высоты 0,3 м от дна сосуда. После заполнения сосуда Дьюара СПГ закрывается запорный клапан криобака. При необходимости аналогичным образом заправляется второй сосуд Дьюара. По команде руководителя испытаний в модельный очаг заливается жидкий азот. Налив жидкого азота прекращается, когда им покрыто дно модельного очага. Передвижные опорно-поворотные устройства с сосудами Дьюара перемещаются к модельному очагу. Для налива СПГ из сосуда Дьюара в модельный очаг передвижное опорно-поворотное устройство устанавливается вплотную к модельному очагу. Налив производится постепенным наклоном сосуда Дьюара до полного переворота горловиной вниз. В случае использования в эксперименте двух сосудов Дьюара, налив из них производится по очереди. Передвижные опорно-поворотные устройства с пустыми сосудами Дьюара отвозятся на расстояние не менее 30 м от модельного очага. Во время налива оператор тушения находится с наветренной стороны от очага на расстоянии не менее 5 м. Количество сжиженного природного газа для проведения одного эксперимента составляет 50 литров на один квадратный метр площади модельного очага. Производится поджиг СПГ в модельном очаге. Факел, которым производится поджиг, должен подноситься к очагу с подветренной стороны. Время свободного горения отсутствует. По команде руководителя тушение начинается сразу с готовностью оператора к тушению. После окончания тушения проводится повторный поджиг модельного очага. Фиксируется время догорания оставшегося СПГ. При определении огнетушащей эффективности воздушно-механической пены применялись стандартные пеногенераторы, изготовленные в соответствии

с требованиями ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, и сжиженный природный газ, содержащий 95 % мольных долей метана.

Для предварительной оценки различий в результативности ликвидации пламенного горения СПГ среди пен низкой, средней и высокой кратности принято решение провести серию экспериментов с фиксированной интенсивностью подачи пены, приготовленной на основе пенообразователей, с уже исследованной изолирующей эффективностью. Подача производилась из насосной установки с мерной емкостью для рабочего раствора пенообразователя объемом 110 л и водяным насосом, изготовленными в соответствии с п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>. Рабочий раствор пенообразователя приготавливался заранее. Температура воды для приготовления рабочих растворов составляла  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . При подаче пены кратностью 12...14 единиц использовались ствол пены низкой кратности по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, обеспечивающий расход рабочего раствора  $(0,166 \pm 0,001) \text{ дм}^3/\text{с}$ , и круглый противень диаметром 1190 мм, высотой 300 мм. При подаче пены кратностью 62...65 единиц использовались ствол пены средней кратности по п. 5.6.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, обеспечивающий расход рабочего раствора  $(0,055 \pm 0,003) \text{ дм}^3/\text{с}$ , и круглый противень диаметром 700 мм, высотой 300 мм. При подаче пены кратностью 350...360 единиц использовались генератор пены высокой кратности по п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, обеспечивающий расход рабочего раствора  $(0,102 \pm 0,002) \text{ дм}^3/\text{с}$ , и круглый противень диаметром 920 мм, высотой 300 мм. Таким образом, для пен низкой, средней и высокой кратности обеспечивалась интенсивность подачи, соответствующая значению  $0,15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Последовательность проведения экспериментов была аналогична последовательности, описанной в п. 5.4, п. 5.6 и п. 5.7 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, для пен низкой, средней и высокой кратности соответственно. Каждый эксперимент повторялся три раза.

В процессе проведения испытаний ликвидировать пламенное горение СПГ пеной низкой и средней кратности, приготовленной на основе различных пенообразователей, не удалось. Тушение пеной высокой кратности оказалось успешным только при использовании пенообразователя с наилучшей изолирующей эффективностью.

Окончательно убедиться в том, что кратность пены играет одну из ключевых ролей в эффективности пенного пожаротушения СПГ, нам позволили эксперименты с использованием ствола ГПС-100 с характеристиками по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 50588–2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний.



**Рис. 6.** Подача пены средней кратности из ствола ГПС-100  
**Fig. 6.** Application of medium expansion foam using GPS-100 pipe

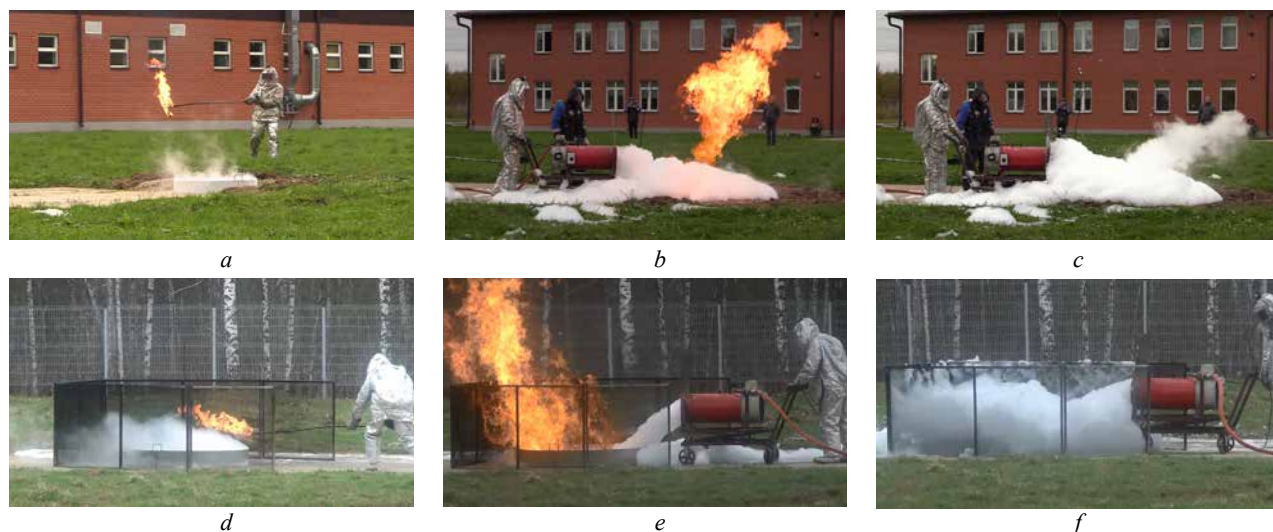
Конфигурация испытательного оборудования со стволом ГПС-100 по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup> и противнем диаметром 1190 мм, высотой 300 мм (рис. 6) позволила обеспечить интенсивность подачи пены  $0,9 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Кратность пены составляла 64...65 единиц. Несмотря на шестикратное увеличение интенсивности, ликвидировать пламенное горение СПГ при помощи ствола ГПС-100 также не удалось.

В дальнейших экспериментах по определению времени тушения от интенсивности подачи пены применялась только пена высокой кратности (рис. 7). За показатель «время тушения» принимался промежуток времени с момента подачи пены до момента прекращения пламенного горе-

ния. В качестве модельных очагов использованы круглые противни, изготовленные из нержавеющей стали, аналогичные тем, которые применялись в предыдущих экспериментах. Площадь противней составляла от  $0,45$  до  $2,0 \text{ м}^2$  с высотой борта  $300 \text{ мм}$ . Сжиженный природный газ из таких очагов испарялся с интенсивностью от  $0,033$  до  $0,038 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что соответствовало скорости испарения СПГ, пролитого на поверхность бетона. При проведении экспериментов на модельных очагах площадью более  $1,5 \text{ м}^2$  применялся экран для сбора пены высокой кратности по п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>, изготовленный из сетки с размером ячейки в свету  $8 \text{ мм}$ . Генератор пены высокой кратности изготовлен в соответствии с требованиями п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>.

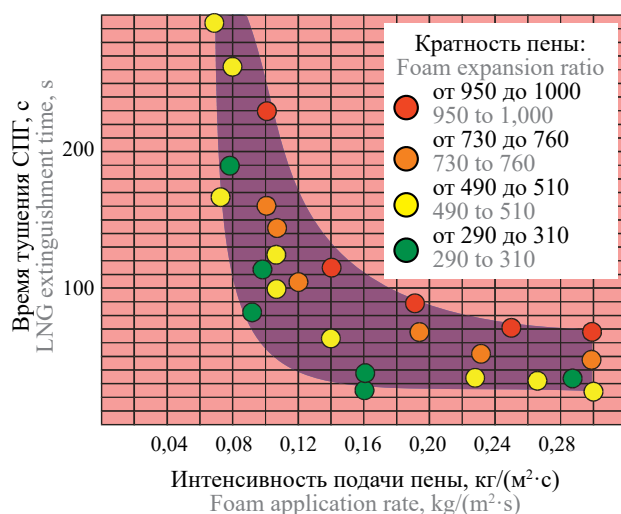
Перед проведением экспериментов по тушению производилась калибровка пеногенератора по кратности и расходу рабочего раствора. При помощи регулировки давления на насосе и оборотов электровентилятора обеспечивалось получение пены кратностью от 290 до 1000 единиц, при расходе рабочего раствора от  $0,09$  до  $0,14 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Определение кратности пены производилось в соответствии с п. 5.3 ГОСТ Р 50588–2012<sup>6</sup>.

На рис. 8 представлен график экспериментальных данных, характеризующих время тушения сжиженного природного газа от интенсивности подачи пены. Исследовано четыре диапазона кратности: от 950 до 1000, от 730 до 760, от 490 до 510 и от 290 до 310 единиц. В результате образовалась область значений, позволяющая оценить возможность



**Рис. 7.** Тушение сжиженного природного газа высокочратной пеной: *a* — поджиг СПГ в противне площадью  $1 \text{ м}^2$ ; *b* — подача пены на поверхность горящего СПГ в противне площадью  $1 \text{ м}^2$ ; *c* — ликвидация пламенного горения СПГ в противне площадью  $1 \text{ м}^2$ ; *d* — поджиг СПГ в противне площадью  $2 \text{ м}^2$ ; *e* — подача пены на поверхность горящего СПГ в противне площадью  $2 \text{ м}^2$ ; *f* — ликвидация пламенного горения СПГ в противне площадью  $2 \text{ м}^2$

**Fig. 7.** Using high expansion foam to extinguish LNG: *a* — LNG ignition in a  $1 \text{ м}^2$  tray; *b* — foam application to the surface of burning LNG in a  $1 \text{ м}^2$  tray; *c* — liquidation of flaming combustion of LNG in a  $1 \text{ м}^2$  tray; *d* — LNG ignition in a  $2 \text{ м}^2$  tray; *e* — foam application to the surface of burning LNG in a  $2 \text{ м}^2$  tray; *f* — liquidation of flaming combustion of LNG in a  $2 \text{ м}^2$  tray



**Рис. 8.** Время тушения СПГ от интенсивности подачи пены  
**Fig. 8.** Dependence of LNG extinguishment time on the foam application rate

применения той или иной кратности пены. Зависимость имеет традиционный вид экспоненциальных кривых с вертикальной асимптотой, соответствующей критической интенсивности подачи пены, характеризующей пенное пожаротушение горючих жидкостей. При повышении интенсивности подачи пены время тушения снижается. Критическая интенсивность при тушении СПГ в 2–3 раза превышает критическую интенсивность подачи пены для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов.

Представленный график свидетельствует о целесообразности применения для тушения СПГ пены кратностью от 300 до 500 единиц. Пена кратностью 1000 единиц оказалась менее эффективна. Прежде всего это объясняется низкой плотностью и высокой вязкостью пены. Из графика видно, что для снижения интенсификации пламенного горения СПГ требуется подача высокократной пены с интенсивностью, превышающей значение  $0,08 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Для тушения пролива СПГ целесообразно устано-

вить интенсивность подачи пены на уровне  $0,17 \pm 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

В процессе проведения экспериментов по определению огнетушащей эффективности высокократной пены выполнена оценка возможности применения порошковых средств пожаротушения для дотушивания остаточного горения от поверхности пенного слоя. На рис. 9 показана подача пены кратностью 300 единиц из воздушно-пенного огнетушителя в противень площадью  $2 \text{ м}^2$ . Расход рабочего раствора составлял  $0,1 \text{ л/с}$ , а интенсивность подачи пены —  $0,05 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . После покрытия поверхности СПГ пеной модельный очаг дотушивался порошком из порошкового огнетушителя с расходом порошка  $2 \text{ кг/с}$  (рис. 10).

Следует отметить, что без предварительного покрытия поверхности СПГ пеной тушение этого очага таким же порошковым огнетушителем не происходит.

Таким образом, совместное применение порошка и воздушно-механической пены является целесообразным. Высота пламени СПГ, которая затрудняет образование требуемой огнетушащей концентрации порошка в очаге горения, снижается. Пенный слой сужает границы области пламенного горения СПГ, поэтому ликвидация горения огнетушащим порошком происходит даже в том случае, если предварительная подача пены производится с интенсивностью ниже критической.

Полученные результаты исследований свидетельствуют, что цель, поставленная в работе, была достигнута. Применение воздушно-механической пены для тушения пожаров сжиженного природного газа считается целесообразным. Полученные конкретные значения характеризуют основные параметры подачи высокократной пены для тушения СПГ. При регулировании интенсивности подачи высокократной пены появляется возможность ее применения как для локализации, так и для ликвидации пламенного горения СПГ. Ключевую роль



**Рис. 9.** Подача пены из воздушно-пенного огнетушителя  
**Fig. 9.** Foam application through an air-foam fire extinguisher



**Рис. 10.** Подача порошка из порошкового огнетушителя для дотушивания горящей поверхности СПГ, покрытой пеной  
**Fig. 10.** Powder application through a powder fire extinguisher to completely extinguish the burning surface of LNG covered in foam



в эффективности тушения играют состав и свойства используемого пенообразователя. Приготовленная на его основе пена должна обладать высоким изолирующим действием. Наилучшую эффективность тушения показывает воздушно-механическая пена кратностью от 300 до 500 единиц. Следует особо отметить, что огневые испытания проведены в металлических противнях, в которых интенсивность испарения СПГ составляла от 0,033 до 0,038 кг/(м<sup>2</sup>·с), что соответствует скорости испарения СПГ, пролитого на поверхность бетона. Поэтому ликвидировать пламенное горение СПГ, пролитого на иную поверхность (песок, земля, гравий и т.д.), с параметрами подачи пены, указанными в данной статье, не представляется возможным. И это еще одна область для будущих исследований, которые предстоит выполнить. Одной из положительных сторон выполненной работы является подтверждение возможности использования в экспериментах стандартизованного испытательного оборудования. Также отработан процесс доставки криогенной жидкости к месту проведения огневых испытаний, что вызывает наибольшую сложность при проведении подобного рода исследований.

На наш взгляд, для реализации технологии контролируемого выгорания СПГ в тех случаях, когда будет затруднительно применение пены высокой кратности, возможно применение пены средней кратности. Например, при сильном ветре. Для этого потребуются проведение дополнительных экспериментов, позволяющих оценить величину снижения теплового потока в зависимости от интенсивности подачи пены средней кратности. Для оценки огнетушащей эффективности пены в будущих работах предлагается сделать два подхода. Первый подход традиционный: когда огнетушащая эффективность определяется по зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены. Второй подход подразумевает определение времени достижения определенной величины теплового потока от интенсивности подачи пены. При оценке огнетушащей эффективности пенообразователей целесообразно использовать первый подход. А для определения эффективности пены, предназначенной для реализации технологии контролируемого выгорания, — второй подход. Второй подход также рационально применять для оценки эффективности пен различной кратности, применяемых для локализации пожара. Также предлагается обсудить вопрос об отказе применения пены низкой кратности для локализации пламенного горения СПГ. На наш взгляд, применение пены низкой кратности нецелесообразно. Даже при использовании пенообразователя с высокими техническими характеристиками пена низкой кратности является недостаточно

сухой, чтобы предотвратить контакт сжиженного природного газа с нижними слоями пены, обводненными рабочим раствором. Поэтому пена низкой кратности будет обладать низким изолирующим действием и низкой способностью предотвращать доступ горючих паров и газов в зону горения.

Совместное применение средств порошкового и пенного пожаротушения позволяет повысить надежность ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа. В случае, если поверхность горящего СПГ уже покрыта высокочрезмерной пеной, порошок может быть эффективно использован для догущивания остаточного горения поверхности пенного слоя. Проведенные собственные исследования подтверждают возможность применения порошка и пены высокой кратности. Для оценки возможности применения порошка и пены средней кратности потребуются проведение дополнительных исследований.

## Заключение

Проведенный анализ литературных источников свидетельствует, что основными средствами тушения проливов сжиженного природного газа являются порошки и воздушно-механическая пена. Для разработки технологии тушения сжиженного природного газа по совокупности его пожаровзрывоопасных свойств необходимо рассматривать горение и тушение сжиженного природного газа как горение и тушение горючей жидкости. При проведении собственных исследований использовалась методика определения изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости и методика определения ее огнетушащей эффективности. Сущность методики определения изолирующего действия пены заключается в расчете изменения величины интенсивности испарения криогенной жидкости в металлическом противне до и после покрытия ее поверхности пеной. В качестве криогенной жидкости применялся сжиженный азот. Измерение количества испарившегося азота производилось весовым способом. Сущность методики определения огнетушащей эффективности заключается в определении времени тушения сжиженного природного газа в модельном противне от интенсивности подачи пены. За время тушения принимался промежуток времени с момента начала подачи пены до момента прекращения пламенного горения сжиженного природного газа. Изменение интенсивности подачи пены производилось за счет использования модельных противней различной площади и регулирования расхода рабочего раствора пенообразователя. При проведении испытаний по определению огнетушащей эффективности пены отработан порядок доставки сжиженного при-



родного газа к месту проведения испытаний. Для оценки целесообразности совместного применения пены с порошковыми средствами пожаротушения производилась подача порошка для ликвидации горения на поверхности сжиженного природного газа, покрытой и непокрытой слоем пены.

Экспериментальные исследования по определению изолирующего действия пены и времени тушения от интенсивности подачи пены свидетельствуют о наибольшей эффективности высократных пен по сравнению с пенами средней и особенно низкой кратности. Установлено, что состав и свойства используемого пенообразователя играют ключевую роль в изолирующей способности пены на поверхности криогенной жидкости. По итогам обсуждения результатов собственных экспериментов с учетом международного и отечественного опыта проведения подобных исследований выявлено, что для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа целесообразно применение пены кратностью от 300 до 500 единиц. Применение порошковых средств пожаротушения целесообразно для ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа, поверхность которого уже покрыта пеной. Порошок также может быть использован для дотушивания остаточного горения поверхности пенного слоя при невозможности обеспечить требуемую интенсивность подачи высократной пены.

### Выводы

1. В результате оценки пожаровзрывоопасных свойств сжиженного природного газа установлена возможность локализации и ликвидации его

пламенного горения с использованием огнетушащих веществ, эффективность применения которых доказана для тушения пожаров горючих жидкостей. Такими огнетушащими веществами являются порошки и воздушно-механическая пена.

2. Экспериментальное определение изолирующего действия пены различной кратности на поверхности криогенной жидкости выявило, что при применении пены высокой кратности имеется возможность предотвращения испарения СПГ, необходимого для поддержания пламенного горения.

3. Экспериментальное определение времени тушения сжиженного природного газа от интенсивности подачи пены показывает, что ликвидация пламенного горения при применении пен низкой и средней кратности не происходит.

4. Для снижения интенсификации пламенного горения СПГ рекомендуется подача высократной пены с интенсивностью, превышающей  $0,08 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Для ликвидации пламенного горения целесообразно установить интенсивность подачи высократной пены на уровне  $0,17 \pm 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

5. Совместное применение порошка и воздушно-механической пены целесообразно. Высота пламени СПГ затрудняет образование требуемой огнетушащей концентрации порошка в очаге горения. Пенный слой существенно снижает высоту пламени и таким образом сужает геометрические границы области пламенного горения. Поэтому тушение СПГ порошком происходит даже в том случае, если предварительная подача высократной пены производится с интенсивностью ниже критической.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алешков М.В., Молчанов В.П., Бастриков Д.Л., Макаров С.А., Третьяков А.В., Иощенко Д.А. Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации горения разливов сжиженного природного газа // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2022. № 1. С. 12–20. DOI: 10.25257/FE.2022.1.12-20
2. Молчанов В.П., Бастриков Д.Л., Молчанов М.В. Пожарная безопасность при использовании газомоторного топлива. Анализ текущего состояния нормативной базы // Эковестник. 2019. № 3. URL: <https://ekovestnik.ru/article/386654/>
3. Сафонов В.С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа. Ч. I. Режимно-технологические особенности систем хранения и отгрузки сжиженного природного газа. М.: ВНИИГАЗ, 2021. 318 с.
4. Сафонов В.С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа. Ч. II. Современные подходы к моделированию аварийных процессов и их последствий на объектах производства, хранения и перевозки сжиженного природного газа. М.: ВНИИГАЗ, 2021. 442 с.
5. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. М.: Нефть и газ, 2009. 640 с.
6. Болодьян И.А., Молчанов В.П., Дешевых Ю.И., Шебеко Ю.Н., Некрасов В.П., Макеев В.И. и др. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы // Пожарная безопасность. 2000. № 2. С. 86–96.
7. Chan S.T. Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area // Journal of Hazardous Materials. 1992. Vol. 30. Issue 2. Pp. 195–224. DOI: 10.1016/0304-3894(92)85078-F
8. Brown T.C., Cederwall R., Chan S., Ermak D., Koopman R., Lamson K. et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials. Law-

- rence Livermore National Laboratory, 1990. 665 p. DOI: 10.2172/6633087
9. 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.
  10. Kamperveen J.P., Spruijt M.P.N., Reinders J.E.A. TNO 2016 R10352. Heat load resistance of cryogenic storage tanks. Results of LNG Safety Program. Utrecht, TNO, 2016. 70 p.
  11. Zang Qian-xi, Liang Dong. Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. Pp. 602–606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
  12. Тагиев Р.М. Первые в мировой практике ширококомасштабные испытания по проливу сжиженного природного газа и последующего его горения в рамках научно-технического сотрудничества ООО «Газпром газобезопасность» и «GDF Suez S.A.» // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. 2013. № 2. С. 58–61.
  13. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. I. М. : Пожнаука, 2004. 713 с.
  14. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. II. М. : Пожнаука, 2004. 774 с.
  15. Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н. Нерешенные проблемы пожаровзрывобезопасности энергоресурсов (СУГ и СПГ) как оборотная сторона успехов энергетической стратегии Российской Федерации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 4. С. 42–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21519968>
  16. Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю., Копылов С.Н., Горшков В.И., Корольченко И.А., Полетаев А.Н. и др. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. М. : ВНИИПО, 2002. 77 с.
  17. Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М. : Пожнаука, 2005. 335 с.
  18. Фещенко А.Н., Макаров С.А., Третьяков А.В., Григорьевская И.И., Битиев Р.Б. Исследование изолирующего действия противопожарной пены на поверхности криогенной жидкости // Проблемы техносферной безопасности — 2022 : сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч. и спец. М. : Академия ГПС МЧС России, 2022. С. 232–238. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48545816>
  19. Yang Jie, Li Yuxing, Zhu Jianlu, Han Hui. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time // Process Safety and Environment Protection. 2018. Vol. 117. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
  20. Krishnan P., Al-Rabbat A., Zhang B., Huang D., Zhang L., Minxiang Zeng et al. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 123. Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.030
  21. Congliang Ye, Min Hua, Xuhai Pan, Baolong He, Juncheng Jiang. Development of heat transfer and evaporation model of LNG covered by Hi-Ex foam // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 44. Pp. 564–572. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.014
  22. Suardin J.A., Yanjun Wang, Willson M., Mannan M.S. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. Pp. 612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
  23. Xiuxia Guo, Congliang Ye, Xinmiao Liang, Xuhai Pan, Min Hua, Godwin Suetor Cyril, Qian Yang. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG // Safety Science. 2021. Vol. 137. P. 105183. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105183
  24. Bin Zhang, Yi Liu, Olewski T., Vechot L., Mannan M.S. Blanketing effect of expansion foam on liquefied natural gas (LNG) spillage pool // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 280. Pp. 380–388. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.078

## REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Molchanov V.P., Batrikov D.L., Makarov S.A., Tret'yakov A.V., Ioshchenko D.A. Prospects for scientific research of air-mechanical foam properties for containing and eliminating liquefied natural gas spills combustion. *Fires and Emergencies: prevention, Liquidation*. 2022; 1:12-20. DOI: 10.25257/FE.2022.1.12-20 (rus).
2. Molchanov V.P., Batrikov D.L., Molchanov M.V. Fire safety when using gas engine fuel. Analysis of the current state of the regulatory framework. *Ecovestnik*. 2019; 3. URL: <https://ekovestnik.ru/article/386654/> (rus).
3. Safonov V.S. *Problems of ensuring the safety of liquefied natural gas facilities. Part I. Regime and technological features of storage and shipment systems of liquefied natural gas*. Moscow, VNIIGAZ, 2021; 318. (rus).
4. Safonov V.S. *Problems of ensuring the safety of liquefied natural gas facilities. Part II. Modern approaches to modeling of emergency processes and their*

- consequences at the facilities of production, storage and transportation of liquefied natural gas. Moscow, VNIIGAZ, 2021; 442. (rus).
5. Rachevsky B.S. *Liquefied hydrocarbon gases*. Moscow, Oil and Gas Publ., 2009; 640. (rus).
  6. Bolodyan I.A., Molchanov V.P., Deshykh Yu.I., Shebeko Yu.N., Nekrasov V.P., Makeev V.I. et al. Fire and explosion safety of liquefied natural gas storage facilities. Evaporation and formation of fire and explosion hazardous clouds at liquid methane spillage. Methods for assessing parameters. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2000; 2:86-96. (rus).
  7. Chan S.T. Numerical simulation of LNG vapor dispersion from a fenced storage area. *Journal of Hazardous Materials*. 1992; 30(2):195-224. DOI: 10.1016/0304-3894(92)85078-F
  8. Brown T.C., Cederwall R., Chan S., Ermak D., Koopman R., Lamson K. et al. *Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1990; 665. DOI: 10.2172/6633087
  9. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Tokarev P.M., Zamyshevskiy E.D. Methods of fire protection of tanks with liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 1999; 8(4):33-42. (rus).
  10. Kampervin J.P., Spruite M.P.N., Reynders J.E.A. *TNO 2016 R10352. Heat load resistance of cryogenic storage tanks. Results of LNG Safety Program*. Utrecht, TNO Publ., 2016; 70.
  11. Zang Qian-xi, Liang Dong. Thermal radiation and assessment of the impact of the fireball BLEVE LNG. *Procedia Engineering*. 2013; 52:602-606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
  12. Tagiev R.M. The first large-scale tests in the world practice on the passage of liquefied natural gas and its subsequent gorenje within the framework of scientific and technical cooperation of Gazprom gazobezopasnost LLC and GDF Suez S.A. *Safety objects of the fuel and energy complex*. 2013; 2:58-61. (rus).
  13. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : handbook : in 2 Part. 2nd ed., reprint. and additional. Part I*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 713. (rus).
  14. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : handbook : in 2 h. 2nd ed., reprint. Pozhnauka. Ch. II*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 774. (rus).
  15. Abduragimov I.M., Kuprin G.N. Unsolved problems of fire and explosion safety of energy resources (LPG and LNG) as the other side of the success of the energy strategy of the Russian Federation. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(4):42-49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21519968> (rus).
  16. Shebeko Yu.N., Navtsenya V.Yu., Kopylov S.N., Gorshkov V.I., Korolchenko I.A., Poletaev A.N. et al. Calculation of the main indicators of fire and explosion hazard of substances and materials : manual. Moscow, VNIPO, 2002; 77. (rus).
  17. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. Foaming agents and foams for extinguishing fires. Composition, properties, application. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005; 335. (rus).
  18. Feshchenko A.N., Makarov S.A., Tretyakov A.V., Grigorievskaya I.I., Bituev R.B. Investigation of the insulating effect of fire-fighting foam on the surface of cryogenic liquid. *Problems of technosphere safety — 2022 : collection of works of XI Scientific and practical International Conference of Young Scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022; 232-238. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48545816> (rus).
  19. Yang Jie, Li Yuxin, Zhu Jianlu, Han Hui. Quantitative study of stability factors of liquid LNG foam: operating parameters and collection containers and time. *Process safety and environmental protection*. 2018; 117:223-231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
  20. Krishnan P., Al-Rabbat A., Zhang B., Huang D., Zhang L., Mingxiang Zeng et al. Increasing the stability of high expansion foam used to reduce the risk of LNG vapor formation using exfoliating zirconium phosphate nanoplates. *Technological safety and environmental protection*. 2019; 123:48-58. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.030
  21. Congliang Ye, Ming Hua, Xiuhai Pan, Baolong He, Juncheng Jiang. Development of a model of heat transfer and evaporation of liquefied natural gas coated with Hi-Ex foam. *Journal of Loss Prevention in the processing industry*. 2016; 44:564-572. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.014
  22. Suardin J.A., Yangjun Wang, Wilson M., Mannan M.S. Field experiments on the use of high expansion foam (HEX) for fire control in a pool for liquefied natural gas. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165:612-622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
  23. Xiuxia Guo, Congliang Ye, Xinmiao Liang, Xiuhai Pan, Ming Hua, Godwin Sueter Cyril, Qian Yang. Analysis of the effect of foam with high expansion on the evaporation rate of LNG. *Science of Safety*. 2021; 137:105183. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105183
  24. Bin Zhang, Yi Liu, Olevski T., Vechot L., Mannan M.S. Protective effect of foaming foam on a tank for spilling liquefied natural gas (LNG). *Journal of Hazardous Materials*. 2014; 280:380-388. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.078

Поступила 22.08.2022, после доработки 19.09.2022;  
принята к публикации 28.09.2022

Received August 22, 2022; Received in revised form September 19, 2022;  
Accepted September 28, 2022

## Информация об авторах

**АЛЕШКОВ Михаил Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 257856; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

**МОЛЧАНОВ Виктор Павлович**, д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, Международный противопожарный центр, Россия, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 76; РИНЦ ID: 387381; ORCID: 0000-0002-8252-139X; e-mail: molvik.box@gmail.com

**МАКАРОВ Сергей Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры общей и специальной химии, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 695632; ORCID: 0000-0002-0057-1247; e-mail: s17031975@rambler.ru

**ИОЩЕНКО Дмитрий Александрович**, заместитель начальника Учебно-научного комплекса пожарной и аварийноспасательной техники, начальник научно-исследовательского отдела, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 767944; ORCID: 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

**ТРЕТЬЯКОВ Алексей Владимирович**, генеральный директор, ЭГИДА ПТВ, Россия, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 18б, корп. 1, пом. 6; РИНЦ ID: 1049573; ORCID: 0000-0002-1988-5238; e-mail: atret@inbox.ru

**БАРЕШКИН Владимир Вадимович**, заместитель генерального директора по науке, ЭГИДА ПТВ, Россия, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 18б, корп. 1, пом. 6; РИНЦ ID: 749350; ORCID: 0000-0001-5874-1635; e-mail: bareshkin@egida-ptv.ru

**БИТУЕВ Рашид Борисович**, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1139160; ORCID: 0000-0001-9323-4348; e-mail: ibitya33@gmail.com

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about the authors

**Mikhail V. ALESHKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of Scientific Work, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 257856; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

**Viktor P. MOLCHANOV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Scientific Work, International Fire Prevention Center, Profsoyuznaya St., 76, Moscow, 117393, Russian Federation; ID RISC: 387381; ORCID: 0000-0002-8252-139X; e-mail: molvik.box@gmail.com

**Sergey A. MAKAROV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of General and Special Chemistry, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 695632; ORCID: 0000-0002-0057-1247; e-mail: s17031975@rambler.ru

**Dmitry A. IOSCHENKO**, Deputy Head of the Educational and Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, Head of the Research Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 767944; ORCID: 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

**Alexey V. TRETYAKOV**, General Director, EGIDA PTV, Klara Tsetkin St., 18b, bldg. 1, r. 6, Moscow, 127299, Russian Federation; ID RISC: 1049573; ORCID: 0000-0002-1988-5238; e-mail: atret@inbox.ru

**Vladimir V. BARESHKIN**, Deputy General Director for Science, EGIDA PTV, Klara Tsetkin St., 18b, bldg. 1, r. 6, Moscow, 127299, Russian Federation; ID RISC: 749350; ORCID: 0000-0001-5874-1635; e-mail: bareshkin@egida-ptv.ru

**Rashid B. BITUEV**, Postgraduate Student of the Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1139160; ORCID: 0000-0001-9323-4348; e-mail: ibitya33@gmail.com

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.