

Научная статья

УДК 614.842.61

doi: 10.34987/2712-9233.2025.76.59.004

Снижение интенсивности испарения сжиженного азота применением порошковых составов, нанесенных на базальтовую ткань

¹Татьяна Валерьевна Проценко

¹Алексей Григорьевич Ивахнюк

¹Екатерина Сергеевна Янина

²Дмитрий Федорович Усов

¹Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

²Главное управление МЧС России по г.Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Валерьевна Проценко, 89236213028@mail.ru

Аннотация. Проведенные лабораторные исследования подтвердили высокую эффективность разработанного метода снижения интенсивности испарения сжиженных природных газов (СПГ). Применение жидкого азота в качестве безопасного модельного вещества обеспечило получение достоверных количественных оценок динамики испарения без риска для исследователей. В ходе экспериментов установлено, что использование базальтовой ткани с нанесёнными порошковыми покрытиями способствует значительному снижению теплового потока к поверхности испаряющейся жидкости, формируя дополнительный теплоизоляционный барьер. Это, в свою очередь, уменьшает образование горючих паровоздушных смесей и снижает вероятность их воспламенения в аварийных ситуациях.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация состава порошковых материалов для повышения их теплоизоляционных свойств и устойчивости к различным условиям эксплуатации. Развитие предложенной технологии откроет возможности для создания более эффективных и доступных способов ликвидации аварийных разливов СПГ, что будет способствовать существенному повышению уровня промышленной безопасности при транспортировке и хранении сжиженных газов.

Ключевые слова: жидкий азот, базальтовая ткань, порошковые материалы, теплоизоляционный барьер, ликвидация аварий, интенсивность испарения.

Для цитирования: Проценко Т.В., Ивахнюк А.Г., Янина Е.С., Усов Д.Ф. Снижение интенсивности испарения сжиженного азота с применением порошковых составов, нанесенных на базальтовую ткань // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 3(19). С. 25-29. <https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.76.59.004>

Reduction of liquefied nitrogen vaporization intensity by using powder compositions applied to basalt fabrics

¹Tatiana Valerievna Protsenko

¹Alexey Grigorievich Ivakhnyuk

¹*Ekaterina Sergeevna Yanina*

²*Dmitry Fedorovich Usov*

¹*St. Petersburg University of State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, St. Petersburg, Russia*

²*Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in St. Petersburg, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: *Tatiana Valeryevna Protsenko, 89236213028@mail.ru*

Abstract. The laboratory studies confirmed the high efficiency of the developed method for reducing the vaporisation intensity of liquefied natural gas (LNG). The use of liquid nitrogen as a safe model substance provided reliable quantitative estimates of vaporisation dynamics without risk for researchers. During the experiments it was found that the use of basalt fabric with applied powder coatings contributes to a significant reduction in the heat flux to the surface of the vaporising liquid, forming an additional thermal insulation barrier. This, in turn, reduces the formation of flammable vapour-air mixtures and reduces the probability of their ignition in emergency situations.

A promising direction for further research is to optimise the composition of powder materials to improve their thermal insulation properties and resistance to various operating conditions. The development of the proposed technology will open up opportunities for creating more effective and affordable methods of LNG emergency spill response, which will contribute to a significant increase in the level of industrial safety during the transportation and storage of liquefied gases.

Keywords: liquid nitrogen, basalt fabric, powder materials, thermal insulation barrier, accident elimination, vapour intensity.

For citation: Protsenko T.V., Ivakhnyuk A.G., Yanina E.S., Usov D.F. Reduction of liquefied nitrogen vaporization intensity with the use of powder compositions applied to basalt fabric // Actual problems of safety in the technosphere 2025. № 3(19). P. 25-29. <https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.76.59.004>

Рост производства и транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) в России сопровождается увеличением риска аварийных ситуаций, связанных с утечками и разливами. Существенную роль в развитии таких происшествий играет высокая скорость испарения СПГ, способствующая быстрому формированию горючих паровоздушных облаков. При контакте с источниками воспламенения такие облака могут вызвать пожары или взрывы, представляя опасность для промышленных объектов, работников и населения вблизи зоны разлива. Для обеспечения безопасных экспериментальных условий в исследованиях применялся жидкий азот, обладающий физико-химическими характеристиками, аналогичными СПГ, и широко используемый в качестве модельной среды [1,2].

Одной из ключевых задач в обеспечении пожарной безопасности при аварийных утечках СПГ является снижение интенсивности его испарения. Замедление фазового перехода из жидкого в газообразное состояние уменьшает объем воспламеняющихся паров, снижает риск образования взрывоопасных смесей и повышает эффективность мер по ликвидации последствий.

Научная практика предлагает несколько методов снижения скорости испарения СПГ в чрезвычайных ситуациях:

- Применение теплоизоляционных материалов, препятствующих передаче тепла к разливу. Сюда относятся маты и ткани, в том числе из базальтового волокна, аэрогели, вспененные полимеры и слоистые покрытия с низкой теплопроводностью.

- Использование порошковых веществ, которые создают физический барьер, частично адсорбируют жидкость и препятствуют теплообмену благодаря гидрофобным свойствам.

Использование охлаждающих жидкостей или ингибиторов

- Орошение разливов охлаждающими агентами, такими как жидкий азот, для временного уменьшения испарения, хотя данный метод требует значительных ресурсов и не всегда технически возможен.

- Быстрое формирование защитного контура вокруг разлива (например, с использованием модульных панелей или надувных барьеров) ограничивает распространение и способствует концентрации пара в пределах допустимых уровней.

- Применение инертных пен с низкой теплопроводностью, позволяющих ограничить испарение, однако такие материалы сложнее применять в холодных условиях и при больших объемах.

В данном исследовании основное внимание уделено методу, основанному на применении порошкового состава, нанесенного на базальтовую ткань, поскольку:

- базальтовая ткань обладает низкой теплопроводностью, устойчива к высоким и низким температурам, а также механическим воздействиям.

- порошковые составы формируют дополнительный теплоизолирующий, препятствующий поступлению тепла и испарению.

- этот метод технологически прост, мобилен, не требует сложного оборудования и может быть реализован непосредственно на месте аварии.

- использование жидкого азота в качестве модельной среды позволило безопасно протестировать предложенную комбинацию материалов.

Выбор данного подхода был обусловлен стремлением создать пассивную, доступную и эффективную систему защиты, пригодную для быстрого применения в аварийных ситуациях.

Целью исследования стало изучение способов уменьшения испарения СПГ для минимизации риска его воспламенения. В лабораторных экспериментах в качестве аналога СПГ применялся жидкий азот, а в качестве теплоизоляционных материалов — порошковые составы, нанесённые на базальтовую ткань. Предполагалось, что комбинация этих компонентов позволит существенно замедлить процесс испарения и снизить концентрацию горючих паров.

Для опытов были использованы порошковые материалы: кварцевый песок SiO_2 с гидрофобными свойствами и водный раствор силиката натрия Na_2SiO_3 (рис.1).



Рис.1. Подготовленные экспериментальные образцы порошковых составов

Составы готовились путём смешивания SiO_2 и Na_2SiO_3 в разных соотношениях (от 35 до 65 % масс.) при комнатной температуре, после чего равномерно наносились на базальтовую ткань (рис. 2). Рецептуры составов приведены в табл. 1.

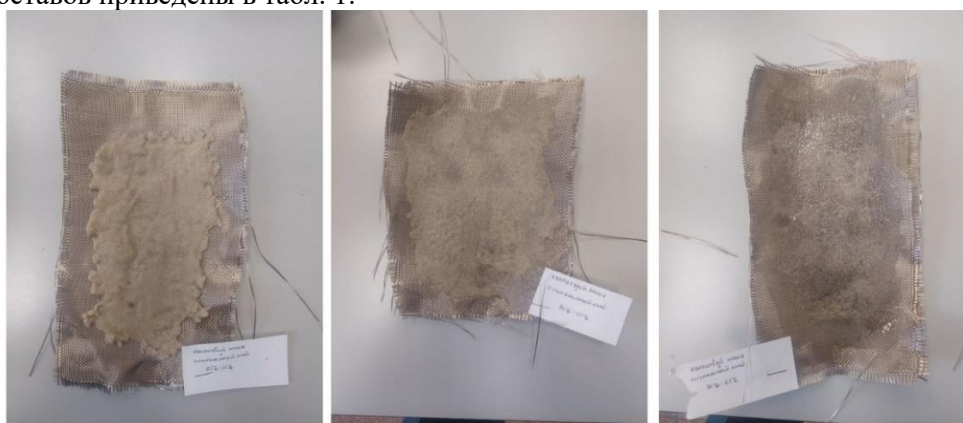


Рис. 2. Образцы порошковых составов на базальтовой ткани (слева направо: А, В, С)

Табл. 1. Порошковые составы, используемые в исследовании

N п/п	Наименование порошкового сорбционного состава	Соотношение концентраций порошковых составов к связующим добавкам, %.
1	A	65
2	B	50
3	C	35

Для оценки скорости испарения жидкого азота использовалась следующая методика [3,4]. Лабораторные испытания проводились следующим образом: в металлический контейнер, размещённом в термостатируемом коробе (лабораторной ячейке), наливался жидкий азот. Контейнер накрывался базальтовой тканью с нанесённым порошковым слоем. Расчёты интенсивности испарения производились в соответствии с ранее оговоренной методикой.

Результаты показали, что использование порошковых покрытий на базальтовой ткани приводит к заметному снижению скорости испарения по сравнению с интенсивностью испарения жидкого азота (N₂). В частности, при использовании состава A/65 интенсивность испарения азота составила 0,08 г/м²·с, что несколько выше, чем у составов B/50 и C/35, показавших значение 0,07 г/м²·с, в то время как интенсивность испарения жидкого азота без применения композитных материалов составила 0,13 г/м²·с. Данный эффект может быть обусловлен более плотной и рыхлой структурой состава A/65. В целом, снижение интенсивности испарения составило 46 % (рис. 3).

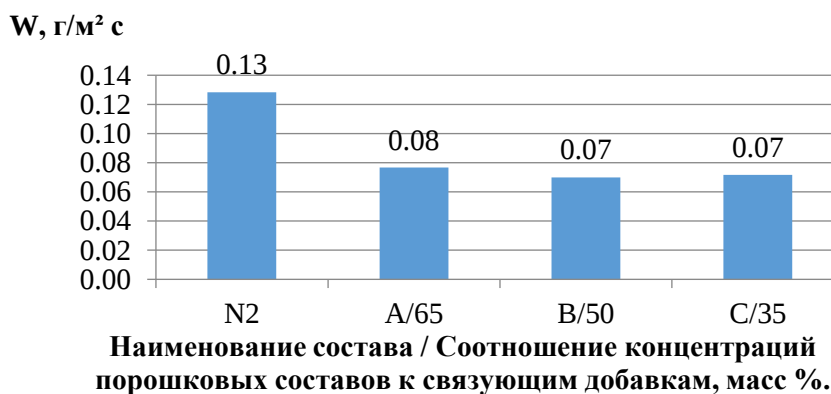


Рис. 3. Гистограмма зависимости интенсивности испарения жидкого азота от применяемых порошковых составов

Применение базальтовой ткани с порошковыми покрытиями позволяет почти в два раза снизить интенсивность испарения по сравнению со свободным испарением жидкого азота. Сама ткань за счёт своих теплоизоляционных свойств уменьшает тепловой поток к поверхности, а порошковый слой дополнительно препятствует передаче тепла и способствует формированию воздушной прослойки, тормозящей испарение.

Таким образом, проведённые эксперименты подтвердили эффективность предложенного метода для снижения интенсивности испарения сжиженных газов. Использование жидкого азота в качестве модельного вещества позволило безопасно получить количественные оценки. В перспективе данная технология может быть доработана для повышения эффективности за счёт оптимизации состава порошковых покрытий, что позволит разработать усовершенствованные методы ликвидации аварийных разливов СПГ и минимизировать риски, связанные с их воспламенением и взрывами.

Список источников

1. Самигуллин, Г. Х. Сравнительный анализ чрезвычайных ситуаций на объектах по производству, хранению, отгрузке сжиженного природного газа и сжиженного углеводородного газа / Г. Х. Самигуллин, З. Б. Евлов, С. В. Шарапов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 4(72). – С. 81-92. – DOI 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-81-92. – EDN VQJHNG.
2. Алешков Михаил Владимирович, Молчанов Виктор Павлович, Бастриков Денис Леонидович, Макаров Сергей Александрович, Третьяков Алексей Владимирович, Иощенко Дмитрий Александрович Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации

горения разливов сжиженного природного газа // Пожары и ЧС. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-nauchnyh-issledovaniy-svoystv-vozdushno-mehanicheskoy-peny-dlya-lokalizatsii-i-likvidatsii-goreniya-razlivov>.

3. Проценко Т.В. Исследование процессов подавления испарения сжиженного азота применением модифицированных воздушно-механических пен и порошковых составов// Сибирский пожарно-спасательный вестник, № 1, 2025. С. 96-106.

4. Bellur K., Médici E.F., Kulshreshtha M., Konduru V., Tyrewala D., Tamilarasan A., McQuillen J., Leão J.B., Hussey D.S., Jacobson D.L., Scherschligt J., Hermanson J.C., Choi C.K., Allen J.S., A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants // Cryogenics. 2016. №. 74. С. 131 – 137. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227515001423>.

5. Эффективный способ получения нанокремнезема из кварцевого песка / Д. В. К. Нгуен, О. В. Александрова, Б. И. Булгаков, В. Б. Петропавловская // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 2(746). – С. 103-111. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-103-111. – EDN AXGRFX.

6. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур / Д.В. Феоктистов, Г.В. Кузнецов, Абедтазехабади Акрам, Е.Г. Орлова, С.П. Бондарчук, А.В. Дорожкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С.72-88.

7. Копырин Михаил Михайлович, Марков Айтал Еремеевич, Дьяконов Афанасий Алексеевич, Данилова Сахаяна Николаевна, Лебедев Михаил Петрович, Туисов Алексей Геннадьевич, Охлопкова Айталиа Алексеевна, Лазарева Надежда Николаевна, Кычкин Анатолий Константинович Сравнение способов повышения адгезии между бутадиеновым эластомером и базальтовой тканью // Ползуновский вестник. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-sposobov-povysheniya-adgezii-mezhdu-butadienovym-elastomerom-i-bazaltovoy-tkanyu>.