



ГК «ПОЖНЕФТЕХИМ». ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ.

«ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ИСПАРЕНИЙ И УПРАВЛЯЕМОГО ВЫГОРАНИЯ СПГ ПРИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВАХ»

Сжиженный природный газ (СПГ) представляет собой охлажденный до криогенных температур природный газ (порядка $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$), находящийся в жидком состоянии при атмосферном давлении. Такое состояние обеспечивает высокую плотность хранения и транспортирования, однако определяет специфические опасности при аварийных разливах.

При попадании СПГ на открытую поверхность происходит его интенсивное кипение с образованием значительных объемов холодного парогазового облака. Облако первоначально имеет повышенную плотность и распространяется у поверхности земли, что увеличивает вероятность его накопления в понижениях рельефа и замкнутых пространствах. По мере нагрева облако становится легче воздуха и поднимается, расширяя зону возможного воздействия.

К основным опасностям СПГ относятся риск образования взрывоопасных концентраций газа, возможность быстрого распространения облака на значительные расстояния, а также высокие тепловые нагрузки при воспламенении пролива. Дополнительным фактором является криогенное воздействие на материалы конструкций и оборудования, приводящее к их охрупчиванию и повреждениям.

Таким образом, аварийные проливы СПГ характеризуются сочетанием факторов быстрого испарения, распространения газовой фазы и потенциально интенсивного горения, что требует применения специальных технических решений, направленных на управление этими процессами.

Эффективность предлагаемых решений с применением пены высокой кратности подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведенных в 2025 году на испытательном учебно-тренировочном полигоне Оренбургского филиала ВНИИПО (приложение – протокол испытаний).



Предлагаемая технология ориентирована на одновременное решение нескольких задач:

- при аварийных разливах без последующего горения - снижение интенсивности испарения СПГ и, как следствие, уменьшение объема образующегося парогазового облака;
- при воспламенении, одновременно со снижением интенсивности испарения, обеспечивается снижение плотности тепловых потоков и создание условий, при которых процесс горения становится управляемым.

Технология может применяться на СПГ-терминалах, установках различной производительности, системах приема, хранения и регазификации СПГ, на криогенных автозаправочных пунктах и т.д..

Соответствие международной практике

Предлагаемый подход не является изолированным инженерным решением, а опирается на сложившуюся международную практику обеспечения безопасности СПГ-объектов и требования профильных нормативных документов. В частности, принципы



обеспечения безопасности и управления аварийными ситуациями на объектах СПГ изложены в стандартах NFPA 59A «Liquefied Natural Gas Code», EN 1473 «Installation and equipment for liquefied natural gas», а также в ISO 16901, регламентирующем вопросы анализа риска.

Указанные документы, а также рекомендации отраслевых организаций (в частности, руководства SIGTTO), исходят из того, что при крупных аварийных проливах СПГ ключевым подходом является контролируемое выгорание (controlled burning), рассматриваемое как более безопасная альтернатива неконтролируемому распространению парогазового облака.

Смысл данного подхода заключается в том, что при невозможности мгновенного прекращения утечки или пролива создаются условия, при которых горение протекает стабильно, с ограниченными тепловыми воздействиями и без резкого роста зоны поражения. Дополнительно учитываются положения стандартов, касающиеся ограничения теплового излучения, управления испарением и локализации аварийных выбросов. Предлагаемая технология реализует именно такой сценарий, дополняя его средствами снижения испарения и теплового излучения.

Сущность технологии

В основе технологии лежит формирование над поверхностью пролива устойчивого изолирующего слоя пены высокой кратности. Этот слой выполняет сразу несколько функций: он экранирует тепловое излучение, снижает интенсивность испарения и одновременно влияет на процесс горения, делая горение более стабильным и менее интенсивным.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при корректно выбранных параметрах подачи пены наблюдается выраженный эффект снижения высоты пламени — в среднем в 2,5–3 раза. Одновременно фиксируется существенное снижение плотности теплового потока, вплоть до значений порядка 28 % от максимальных, характерных для стадии свободного горения. Это означает, что тепловое воздействие на оборудование и конструкции уменьшается кратно, что принципиально важно для предотвращения эскалации аварии.



Ключевым параметром является интенсивность подачи пены. Испытания показали, что при значении порядка $0,17 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ обеспечивается быстрое формирование устойчивого пенного слоя, обладающего достаточной стойкостью даже при воздействии пламени и внешних факторов. При меньших интенсивностях покрытие формируется медленно, оказывается неустойчивым и становится критически зависимым от ветра, осадков и других условий.

В ходе исследований также были определены дополнительные расчетные параметры, необходимые для проектирования установок управляемого выгорания СПГ. В частности, установлена требуемая кратность пены — не менее 400, а также определен коэффициент, учитывающий разрушения пены при подаче на поверхность горящего СПГ ($K = 1,5$ для первого цикла подачи пены с последующим снижением).



Таким образом, сформирован полный набор параметров, позволяющий выполнять расчет и проектирование систем управляемого выгорания СПГ для различных объектов защиты.

Состав технологического комплекса

Реализация технологии требует применения комплекса оборудования, элементы которого работают согласованно и обеспечивают требуемые параметры подачи и формирования пены.

Ключевую роль играют генераторы пены высокой кратности. Они выполнены в специальном исполнении, рассчитанном на наружную установку, и способны сохранять работоспособность при воздействии ветра, высоких температур и криогенных факторов. Испытания показали, что даже после многократного огневого воздействия оборудование сохраняет геометрию и функциональность.



Не менее важным элементом является система хранения и дозирования пенообразователя (СХДП), реализованная на базе бак-дозатора типа «Антифайер». Ее конструкция обеспечивает стабильное введение пенообразователя в поток воды и поддержание требуемой концентрации, что особенно важно при использовании составов повышенной вязкости. СХДП может быть реализована в мобильном и стационарном вариантах.

Применяемый пенообразователь представляет собой синтетический фторсодержащий спиртоустойчивый состав (тип AFFF/AR) специальной рецептуры с рабочей концентрацией порядка 3 %. Он обеспечивает получение пены высокой кратности (не менее 400) и сохраняет устойчивость при контакте с СПГ и в условиях теплового воздействия.

Дополнительно в состав системы входят насосное оборудование, трубопроводная обвязка, средства управления и автоматики, а также устройства дистанционного пуска, обеспечивающие оперативное введение системы в работу.



Дополнительные технические решения и режимы применения

Технология предполагает гибкое применение в зависимости от сценария развития аварии, включая как ситуации с горением, так и без него.

Дополнительным элементом технологии являются водяные веерные завесы, формируемые с использованием дренчерных оросителей специального назначения типа НП-III. Такие завесы создают плотный дисперсный водяной экран, который эффективно рассеивает газовую фазу и ограничивает ее распространение. Практика показывает, что их применение позволяет локализовать облако даже при наличии ветровых воздействий.

Совместное использование пены высокой кратности и водяных завес обеспечивает комплексное воздействие: подавление испарения на поверхности пролива и ограничение



распространения уже образовавшейся газовой фазы, либо дополнительное снижение тепловых потоков на соседние объекты.

Преимущества технологии и порядок реализации

Предлагаемая технология носит комплексный характер и сочетает несколько взаимодополняющих механизмов воздействия на аварийный процесс. Ее эффективность подтверждена результатами испытаний, показавшими устойчивость оборудования и существенное снижение тепловых и динамических параметров горения.

Важным преимуществом является адаптированность решения к реальным условиям эксплуатации, включая воздействие ветра и температурные колебания, а также возможность интеграции в существующие системы пожаротушения и масштабирования под объекты различной сложности.

Практическая реализация технологии осуществляется поэтапно. На первом этапе выполняется сбор исходных данных и анализ сценариев аварий. Далее разрабатывается концепция системы защиты с последующим выполнением расчетов и моделирования. На завершающем этапе подготавливается проектная документация, а при необходимости проводятся демонстрационные или приемочные испытания.

Таким образом, предлагаемая технология позволяет перевести аварийную ситуацию, связанную с проливом СПГ, в контролируемый режим, при котором последствия становятся предсказуемыми и управляемыми. За счет применения пены высокой кратности, специализированного оборудования и водяных завес достигается существенное снижение теплового воздействия, ограничение испарения и локализация опасной зоны, что соответствует современным международным подходам к обеспечению безопасности СПГ-объектов.

Приложение:

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Протокол испытаний «Проведение исследований возможности и эффективности применения воздушно-механической пены высокой кратности (тип «Аквафом» - ИНСВ-3%, с рабочей концентрацией 3% /тип пены AFFF/AR по ГОСТ Р 50588-2012) при ликвидации аварийных ситуаций на объектах с обращением СПГ».