

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «09» августа 2024 г. № 251

**РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ
«МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ
АНАЛИЗА РИСКА НА ОБЪЕКТАХ ПРОИЗВОДСТВА,
ТРАНСПОРТИРОВКИ, ХРАНЕНИЯ, ОТГРУЗКИ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА»**

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа риска на объектах производства, транспортировки, хранения, отгрузки и использования сжиженного природного газа» (далее – Руководство) разработано в целях содействия соблюдению требований:

пункта 1 статьи 14 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» в части осуществления организациями, эксплуатирующими опасные производственные объекты сжиженного природного газа (далее – ОПО СПГ), оценки и анализа риска аварий;

раздела V федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа», утвержденных приказом Ростехнадзора от 11 декабря 2020 г. № 521 (зарегистрирован Минюстом России 21 декабря 2020 г., регистрационный № 61629).

2. Руководство рекомендовано для применения организациям, эксплуатирующим ОПО СПГ, на которых осуществляются технологические процессы производства, хранения, приема, отгрузки, регазификации сжиженного природного газа (далее – СПГ), включая технологические линии, модули, объекты на основании гравитационного типа, на которые

распространяются требования федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа», утвержденных приказом Ростехнадзора от 11 декабря 2020 г. № 521 (зарегистрирован Минюстом России 21 декабря 2020 г., регистрационный № 61629), федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденных приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2020 г. № 533 (зарегистрирован Минюстом России 25 декабря 2020 г., регистрационный № 61808).

3. Руководство разработано в соответствии с требованиями к количественному анализу риска аварий в разделе V федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа», утверждённых приказом Ростехнадзора от 11 декабря 2020 г. № 521(зарегистрирован Минюстом России 21 декабря 2020 г., регистрационный № 61629), и содержит рекомендации по методическим подходам к моделированию аварийных ситуаций и инцидентов, определению сценариев аварий, оценке последствий воздействия поражающих факторов аварии и расчету показателей риска, связанного с выбросом СПГ и иных опасных веществ, обращающихся на ОПО СПГ, при разработке:

проектной документации на строительство или реконструкцию ОПО СПГ;
документации на техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию ОПО СПГ;

декларации промышленной безопасности ОПО СПГ;

обоснования безопасности ОПО СПГ;

плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО СПГ;

документов по анализу риска аварий в составе документационного обеспечения систем управления промышленной безопасностью.

4. Рекомендации Руководства не распространяются на:

морские и речные транспортные средства для перевозки СПГ;

железнодорожные, автомобильные и другие виды транспортных средств для перевозки СПГ;

криогенные бортовые топливные системы транспортных средств, использующие СПГ в качестве моторного топлива, а также на передвижные заправщики за пределами объекта малотоннажного производства или потребления СПГ;

криогенные автозаправочные станции газомоторного топлива, используемого в двигателях внутреннего сгорания, снабжающие транспортные средства (автотранспорт, автотракторную технику, железнодорожный и водный транспорт) сжиженным природным газом.

При необходимости оценки риска аварий на указанных объектах, например, при учете эскалации аварий, допускается использовать методы, представленные в Руководстве, при их обосновании.

5. Организации, осуществляющие анализ на ОПО СПГ, могут использовать иные обоснованные способы и методы, чем те, которые указаны в Руководстве.

6. При организации проведения анализа риска, в том числе при разработке технического задания на проведение работ, выборе методов анализа риска, показателей риска и оформлении результатов рекомендуется использовать Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённое приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387, а также положения Руководства.

7. В Руководстве используются термины и определения, приведенные в приложении № 1, а также сокращения, приведенные в приложении № 2 к Руководству.

II. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К АНАЛИЗУ РИСКА АВАРИЙ ОПО СПГ

8. В общую процедуру анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО СПГ рекомендуется включать:

планирование и организацию работ по анализу риска аварий в соответствии с Руководством по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утвержденным приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387;

идентификацию опасностей, которые могут привести к инцидентам и авариям, в том числе с эскалацией аварии;

анализ неопределенностей, в соответствии с пунктом 29 Порядка оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов и перечня включаемых в нее сведений, утвержденного приказом Ростехнадзора от 16 октября 2020 г. № 414;

определение вероятностей (частот) возникновения инцидентов и аварий;

построение сценариев развития возможных аварий и определение вероятности (частоты) реализации каждого сценария;

оценку количества опасных веществ, участвующих в аварии и создании поражающих факторов, в том числе истечение, растекание, испарение СПГ, дрейф облака топливно-воздушной смеси паров природного газа с воздухом;

расчет зон действия поражающих факторов;

оценку последствий аварий;

расчет индивидуального, коллективного, социального риска, частоты разрушения зданий, сооружений, эскалации аварий и иных показателей риска аварий;

определение наиболее опасных составных элементов (участков) ОПО по возможным последствиям и показателям риска;

рекомендации по снижению риска аварий на ОПО СПГ.

9. Исходные данные, допущения¹ и результаты оценки риска аварий рекомендуется обосновывать и документально фиксировать в объеме, достаточном для того, чтобы выполненные расчеты и выводы могли быть проверены и повторены специалистами (например, при экспертизе

¹ Допущения – предположения, не обязательно основанные на фактах, но принимаемые как достоверные с целью проведения расчетов по анализу риска аварий в ходе использования моделей аварийного процесса.

промышленной безопасности), которые не участвовали при первоначальном анализе риска аварий.

10. Форма представления и содержание отчетов по оценке риска аварий для последующего направления заказчику определяются согласно действующим документам (федеральным нормам и правилам, приказам Ростехнадзора) по оформлению в области, соответствующей области их применения. Общие рекомендации к оформлению результатов оценки риска приведены в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

III. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

11. При планировании и организации работ рекомендуется:

конкретизировать цели и задачи проведения оценки риска аварий на ОПО СПГ;

определять полноту необходимой информации, методы и ограничения планируемой процедуры по оценке риска аварий,

выбирать соответствующие показатели опасности;

устанавливать критерии допустимого (приемлемого) риска.

При оценке воздействия криогенных температур и криогенного риска (риска аварии, связанного с поражающим воздействием низких температур на оборудование, конструкции сооружений и людей) рекомендуется применение качественных или полуколичественных показателей и методов в соответствии с пунктом 21 и приложением № 8 Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённого приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

Под криогенным (низкотемпературным) воздействием понимается воздействие вследствие аварийного выброса (утечки) криогенной среды² (в том

² Криогенная среда - сжиженный газ с температурой кипения 77° К и выше (ГОСТ Р 71127-2023).

числе смесей криогенных жидкостей с опасными веществами), приводящего к опасности поражения (обморожения) людей, повреждения (разрушения) охлаждаемого технологического оборудования, строительных конструкций. Основными поражающими факторами криогенного воздействия являются температура криогенной среды в окружающем пространстве, длительность криогенного воздействия, фазовое состояние выброса криогенной среды (жидкость, двухфазная среда, газ). Основными опасными веществами, способными оказывать низкотемпературное, в том числе криогенное, воздействие, в соответствии с пунктами 6.1 – 6.3 ГОСТ Р 57431-2017 (ИСО 16903:2015). «Национальный стандарт Российской Федерации. Газ природный сжиженный. Общие характеристики», утверждённого и введённого в действие приказом Росстандарта от 30 марта 2017 г. № 219-ст, являются СПГ, метан, этан, смешанные хладагенты, используемые в технологической системе сжижения, и сжиженный азот.

При количественной оценке риска криогенного воздействия на конструкции (оборудование, сооружения) рекомендуется рассчитывать частоту достижения этими воздействиями заданного уровня (температуры выброса опасных веществ с учетом времени воздействия) по аналогии с распределениями потенциального риска гибели человека, распределениями превышения определенного давления на фронте ударной волны или теплового потока.

При количественной оценке риска допускается не учитывать возможность террористических актов, военных действий и иных форс-мажорных ситуаций, не связанных с опасностями технологических процессов.

12. Для оценки риска рекомендуется использовать показатели, характеризующие возможное число пострадавших и погибших при авариях, ущерб от возможных аварий, а также показатели риска гибели людей и риска причинения материального и экологического ущерба в интегральных и удельных показателях. Перечень рассчитываемых показателей риска аварий рекомендуется определять на основании задач оценки риска на ОПО СПГ, определенных на этапе планирования и организации работ, в соответствии

с Руководством по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утвержденным приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

IV. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНОСТЕЙ АВАРИЙ НА ОПО СПГ

13. При идентификации опасностей аварий рекомендуется:

а) определить источники возникновения возможных инцидентов и аварий, связанных с нарушением герметичности, разрушением сооружений и (или) технических устройств на ОПО, неконтролируемыми выбросами и (или) взрывами опасных веществ. Источниками повышенной опасности на ОПО СПГ являются:

емкостное оборудование, содержащее опасные вещества (включая изотермические хранилища СПГ и этана, хранилища хладагентов (пропана, бутана) под давлением, оборудование для очистки и осушки газа);

трубопроводы, имеющие запорную и регулирующую арматуру, транспортирующие опасные вещества (сжатый газ, стабильная жидкость, сжиженные давлением углеводородные газы (нестабильные жидкости), жидкий СПГ при температуре кипения);

насосно-компрессорное оборудование;

системы погрузки (разгрузки) СПГ на танкеры, в автомобильные и железнодорожные цистерны;

теплообменное оборудование (теплообменники, аппараты воздушного охлаждения, системы регазификации);

б) провести разделение ОПО СПГ на составные части (цехи, участки, площадки, хранилища, сооружения, технические устройства или составляющие ОПО, объединяющие технические устройства или их совокупность по технологическому или территориально-административному принципу и входящие в состав ОПО) при необходимости проведения анализа риска аварий на них;

выделить характерные причины возникновения аварий на ОПО или его составных частях. По результатам ежегодного анализа состояния промышленной безопасности, проводимого в Ростехнадзоре, основными причинами возникновения аварийных ситуаций на ОПО СПГ являются:

отказы или неполадки оборудования, технических устройств;

ошибочные действия персонала;

внешние воздействия природного и техногенного характера;

в) определить основные (типовые) сценарии аварий с предварительной оценкой риска, при этом рассмотреть инициирующие и последующие события, приводящие к возможному возникновению поражающих факторов аварий, в том числе сценарии, учитывающие взаимное влияние последствий аварий на соседних объектах.

Особенности возможных аварийных выбросов СПГ и последствий аварий на ОПО СПГ приведены в приложении № 3 к Руководству.

14. На этапе идентификации опасностей могут быть даны предварительные рекомендации по уменьшению опасностей аварий с оценкой их достаточности либо выводы о необходимости проведения более детального анализа риска.

15. В целях идентификации опасностей рекомендуется использовать результаты анализа опасностей технологических процессов, обоснования технических и организационных мер предупреждения аварий и инцидентов, в том числе при разработке обоснования безопасности ОПО.

V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ (ЧАСТОТ) ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНЦИДЕНТОВ И АВАРИЙ НА ОПО СПГ

16. Рекомендуемые для расчётов частоты аварийной разгерметизации типового оборудования на ОПО СПГ приведены в приложении № 4 Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённого приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387. Данные по частотам разгерметизации рекомендуется уточнять при их обосновании с указанием источника информации.

17. Для анализа опасностей, оценки частот разгерметизации и иных аварийных ситуаций при наличии необходимой информации рекомендуется также использовать метод анализа деревьев отказов, изложенный в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

Пример дерева отказов для анализа опасностей аварий для ОПО СПГ приведен в приложении № 4 к Руководству.

VI. ПОСТРОЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА ОПО СПГ

18. Свойства обрабатываемых веществ и условия их обращения на ОПО СПГ определяют сценарий развития аварии (например, взрыв, пожар, рассеивание без воспламенения, токсическое поражение, загрязнение ОС, криогенное (низкотемпературное) воздействие, снижение концентрации кислорода³ в воздухе менее 12% объемных).

19. Примеры типовых сценариев аварий на ОПО СПГ приведены в приложении № 5 к Руководству.

20. При определении сценариев на последних этапах развития аварий рекомендуется учитывать сочетание последовательных сценариев (последующее развитие аварии в случае, если затронутое оборудование содержит опасные вещества) или «эффект домино».

21. Для определения условной вероятности сценария развития аварии рекомендуется использовать метод построения деревьев событий в соответствии с Руководством по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

Примеры деревьев событий для ОПО СПГ приведены в приложении № 6 к Руководству.

³ Дефицит кислорода, который может привести к обездвиживанию и последующему летальному исходу незащищенного человека, возникает при концентрации паров СПГ в воздухе выше 40% объемных.

VII. ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ, УЧАСТВУЮЩИХ В АВАРИИ И СОЗДАНИИ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ. РАСЧЕТ ЗОН ДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ

22. Зоны действия поражающих факторов рекомендуется определять на основе:

а) оценки количества опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов аварий;

б) расчета количественных параметров, характеризующих действие поражающих факторов (давление и импульс для ударных волн, интенсивность теплового излучения для пламени, размеры пламени и зоны распространения высокотемпературной среды при термическом воздействии, дальность дрейфа облака ТВС до источника зажигания, токсическое воздействие, поражающее действие осколков, загрязнение ОС, размеры зон криогенного (низкотемпературного) воздействия, снижения содержания кислорода).

В качестве расчетной температуры при моделировании аварийных ситуаций допускается принимать максимальную среднемесячную температуру окружающего воздуха в наиболее теплый месяц года за 10-летний период метеонаблюдений.

23. Массу аварийного выброса опасных веществ рекомендуется определять с учетом перетоков от соседних аппаратов (участков) в течение времени обнаружения выброса и срабатывания запорной арматуры (задвижек)⁴ с учетом массы стока вещества из отсеченного блока (трубопровода).

24. При отсутствии достоверных сведений расчетное время выброса опасных веществ (с учетом времени обнаружения выброса и срабатывания задвижек) рекомендуется принимать равным 120 секунд в случае наличия на аварийном участке современных систем обнаружения утечек и противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), проверенной на соответствие требованиям функциональной безопасности систем электрических,

⁴ Время срабатывания – промежуток времени, в течение которого происходит срабатывание арматуры, т.е. перемещение запирающего элемента из одного крайнего положения в другое (пункт 6.27 ГОСТ Р 52720-2007 «Арматура трубопроводная»).

электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью и для которых назначен уровень полноты безопасности (УПБ) не ниже УПБ1 (SIL1). При использовании дистанционного управления блокировкой аварийного участка время выброса принимается равным 600 секунд. В ином случае при отсутствии достоверных сведений расчетное время выброса рекомендуется определять согласно пункту 30 Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности», утверждённого приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 414.

При расчете последствий аварий рекомендуется учитывать возможность полного истечения опасных веществ из аварийных участков до срабатывания системы противоаварийной защиты и перекрытия потока.

25. Рекомендуемые математические модели для численного расчета процессов истечения, распространения, воспламенения и взрыва топливно-воздушных смесей с участием СПГ приведены в приложении № 7 к Руководству.

26. При определении условной вероятности воспламенения аварийных выбросов взрывопожароопасных газов рекомендуется учитывать размещение источников зажигания по близлежащей территории. При отсутствии необходимых данных условную вероятность воспламенения рекомендуется определять согласно приложению № 6 Руководства.

27. При отсутствии сведений о распределении источников зажигания момент времени и условия взрыва облаков ТВС рекомендуется определять с учётом рекомендаций пункта 17 Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей», утверждённого приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 412.

28. Примеры расчёта зон поражения при авариях на ОПО СПГ приведены в приложении № 8 к Руководству.

VIII. ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ

29. Рекомендуемая оценка последствий и ущерба от возможных аварий включает описание и определение размеров возможных воздействий на людей,

имущество и (или) окружающую среду. При этом рекомендуется оценивать физические эффекты аварийных событий (разрушение технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы криогенных и токсичных веществ), уточнять объекты, которые могут подвергнуться воздействиям поражающих факторов аварий, использовать соответствующие модели аварийных процессов совместно с критериями поражения человека и групп людей, а также критерии разрушения технических устройств, зданий и сооружений.

30. Для расчета размеров зон поражения людей и разрушения сооружений рекомендуется использовать детерминированные и (или) вероятностные критерии поражений людей, повреждения и разрушения зданий, сооружений, в том числе для криогенного воздействия СПГ, которые приведены в приложении № 9 к Руководству.

31. Число пострадавших от аварий, как правило, определяется числом людей, оказавшихся в зоне действия поражающих факторов (исходя из принципа «поглощения большей опасностью всех меньших опасностей»). Рекомендуемый алгоритм расчета ожидаемого числа пострадавших приведен в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

32. Оценку материального ущерба от аварий на ОПО СПГ рекомендуется производить на основе расчета вреда (экономического ущерба и вреда окружающей среде) в составе декларации промышленной безопасности ОПО в соответствии с пунктами 9 и 10 Порядка оформления декларации промышленной безопасности ОПО и перечня включаемых в нее сведений, утверждённого приказом Ростехнадзора от 16 октября 2020 г. № 414.

IX. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РИСКА АВАРИЙ НА ОПО СПГ

33. Расчет индивидуального, потенциального, социального, коллективного риска и иных показателей риска рекомендуется производить в соответствии

с Руководством по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

34. В соответствии с задачами анализа риска аварий помимо основных могут применяться и дополнительные показатели риска.

X. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА АВАРИЙ НА ОПО СПГ

35. На этапе разработки мер по снижению риска аварий рекомендуется в качестве первоочередных мер планировать и разрабатывать:

обоснованные рекомендации по снижению риска аварий для наиболее опасных составных частей ОПО СПГ;

способы предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий на ОПО СПГ.

36. В соответствии с Основами государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу, утверждёнными Указом Президента Российской Федерации от 6 мая 2018 г. № 198, в рамках риск-ориентированного подхода рекомендуется выделять три группы мер обеспечения безопасности, имеющие следующие приоритеты:

а) меры, снижающие возможность возникновения аварий, включающие:

уменьшение возможности возникновения инцидентов;

уменьшение вероятности перерастания инцидента в аварию;

б) меры, снижающие тяжесть последствий возможных аварий, включающие:

уменьшение вероятности эскалации аварий, когда последствия какой-либо аварии становятся непосредственной причиной аварии на соседних составных частях ОПО СПГ;

уменьшение вероятности нахождения групп людей в зонах поражающих факторов аварий;

ограничение возможности возрастания масштаба и интенсивности

воздействия поражающих факторов аварий;

уменьшение вероятности развития аварий по наиболее опасным сценариям возможных аварий;

увеличение требуемого уровня надежности системы противоаварийной защиты, средств активной и пассивной защиты от воздействия поражающих факторов аварий;

в) меры обеспечения готовности к локализации и ликвидации последствий аварий.

37. В качестве приоритетных способов предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий рекомендуется использовать:

пассивную защиту расстоянием от зоны опасного воздействия поражающих факторов возможных аварий на стадии проектирования ОПО СПГ;

активную защиту от перерастания аварийной опасности в угрозу аварии, опасной для жизни и здоровья человека, имущества и окружающей среды, на стадии эксплуатации ОПО СПГ.

Приложение № 1
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2021 г. № 257

Термины и определения

Авария – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на ОПО, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ (статья 1 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»).

Взрыв – быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов (пункт 3 статьи 2 Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»).

Допустимый риск – риск, который в данной ситуации считают приемлемым при существующих общественных ценностях (статья 3 ГОСТ Р 51898-2002: Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты).

Идентификация опасности (hazard identification) – процесс осознания того, что опасность существует, и определения ее характерных черт (статья 2 ГОСТ Р 51901.1-2002: «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем», принятого и введённого в действие Постановлением Госстандарта Российской Федерации от 7 июня 2002 г. № 236-ст).

Инцидент – отказ или повреждение технических устройств, применяемых на ОПО, отклонение от установленного режима технологического процесса (статья 1 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»).

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени НКПР (ВКПР) – минимальное (максимальное) содержание горючего

вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания (пункт 2.5.1. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения», утверждённого и введённого в действие Постановлением Госстандарта СССР от 12 декабря 1989 г. № 3683).

Огненный шар – крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара (пункт 3.11. ГОСТ Р 12.3.047-2012. «Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля», утверждённого и введённого в действие приказом Росстандарта от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст).

Опасность (hazard) – источник потенциального вреда или ситуация с потенциальной возможностью нанесения вреда (статья 2 ГОСТ Р 51901.1-2002: «Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем», принятого и введённого в действие Постановлением Госстандарта Российской Федерации от 7 июня 2002 г. № 236-ст).

Опасные вещества – воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, указанные в пункте 1) приложения № 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Опасный производственный объект – предприятие или его цехи, участки, площадки, а также иные производственные объекты, указанные в приложении № 1 к Федеральному закону 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Промышленная безопасность ОПО (промышленная безопасность, безопасность ОПО) – состояние защищенности жизненно важных интересов

личности и общества от аварий на ОПО и последствий указанных аварий (статья 1 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»).

Сжиженный природный газ (СПГ):

- природный газ, сжиженный после переработки с целью хранения или транспортирования (статья 2 ГОСТ Р 53521-2009: «Переработка природного газа. Термины и определения», утверждённого и введённого в действие приказом Ростехрегулирования от 14 декабря 2009 г. № 764-ст).

- жидкость в криогенном жидком состоянии, которая состоит преимущественно из метана и которая может содержать незначительные количества этана, пропана, азота и других компонентов, обычно встречающихся в природном газе (NFPA 59A, Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)).

Требования промышленной безопасности – условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в Федеральном законе от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», других федеральных законах, принимаемых в соответствии с ними нормативных правовых актах Президента Российской Федерации, нормативных правовых актах Правительства Российской Федерации, а также федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности (пункт 1 статьи 3 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»).

Приложение № 2
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 257

Перечень сокращений

- АГНКС – автомобильная газонаполнительная компрессорная станция;
АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
ВКПР – верхний концентрационный предел распространения пламени;
ГРС – газораспределительная станция;
ГФ – газовая фаза;
ЖФ – жидкая фаза;
НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени;
ОГТ – основание гравитационного типа;
ОПО – опасный производственный объект;
ОПО СПГ – производственный объект, на котором обращается СПГ;
ОШ – огненный шар;
ОС – окружающая среда;
ПАЗ – противоаварийная автоматическая защита;
ПК – предохранительный клапан;
ПРГУ – плавучая регазификационная установка;
СПГ – сжиженный природный газ;
ССПП – стационарная система предотвращения пожара;
СУГ – сжиженный углеводородный газ;
ТВС – топливно-воздушная смесь;
УВ – ударная волна;
УПБ (SIL) – уровень полноты безопасности (Safety Integrity Level).
-

Приложение № 3
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 257

**Особенности возможных аварийных выбросов СПГ
и последствий аварий на ОПО СПГ**

Основные опасности аварий на ОПО СПГ связаны с возможностью выброса обращающихся в технологическом процессе опасных веществ, в том числе природного газа в сжиженном и сжатом состоянии, хладагентов (этан, пропан, бутан), стабильного и нестабильного конденсата. Анализ опасностей ОПО СПГ определяется необходимостью учета криогенного состояния природного газа в оборудовании и больших объемов изотермического хранения СПГ, в том числе в резервуарах объемом более 100 тыс. м³.

В связи с этим при анализе риска выброса СПГ особое внимание рекомендуется уделять таким следующим факторам:

- обращение в оборудовании больших объемов СПГ с возможностью аварийного выброса в атмосферу повышенных объемов газовой и жидкой среды в существенно различном термодинамическом состоянии;
- возможность ограничения разлива жидкой фазы СПГ по территории ОПО;
- срабатывание систем защиты, меры безопасности для сокращения объемов выброса СПГ в окружающую среду;
- возможность образования протяженных зон поражения.

Наличие СПГ и ряда СУГ предполагает наличие специфических факторов, обусловленных следующими свойствами обращающихся веществ:

- изотермическое хранение предполагает появление низких температур: около минус 160°С на хранилищах СПГ и минус 73°С на хранилищах этана

(на объектах производства СПГ), на «малотоннажных» объектах с СПГ может реализовываться и полуизотермическое хранение СПГ с давлением до 1,2 МПа;

- повышенные пределы воспламенения метана (4,4-17 %-об.) по сравнению с иными углеводородами создают взрывоопасные концентрации при повышенных концентрациях СПГ;

- наличие перегретых жидкостей, способных при сбросе давления переходить в газовую фазу (пропан, бутан, СПГ в полуизотермическом хранении);

- наличие примесей (этан, пропан, бутан и др.) повышают реакционную способность ТВС по сравнению с чистым метаном;

- различные составы (и плотности) СПГ при последовательном доливе в уже частично заполненный объем создают предпосылки к расслоению жидких фаз. Такое расслоение приводит к слабому тепло- и массообмену между слоями, в результате верхний слой быстро испаряется, что приводит к увеличению его плотности, а нижний нагревается за счет теплообмена с емкостью, что приводит к уменьшению его плотности. Такие процессы приводят к возникновению гидродинамической неустойчивости на границе слоев. Более тяжелый верхний слой в поле силы тяжести начинает смешиваться с менее плотным нижним слоем. Такое смешение приводит к интенсивному образованию паров и требует более интенсивного отвода паров из емкости. Это явление называется «ролловер», оно возникает либо при дозаправке емкости системы заправки новой дозой (порцией), физические параметры которой отличаются от имеющейся, либо за счет саморасслоения СПГ вследствие преимущественного выкипания из него азота. По этой причине происходит стратификация СПГ (или иного сжиженного газа) на два горизонтальных слоя. Нижний слой за счет внешнего теплопритока перегревается и аккумулирует часть тепла, не успевая передать его на верхний. При возникновении «ролловера» происходит потеря устойчивости расслоившегося слоями жидкого объема СПГ и интенсивное перемешивание этих слоев, накопленное тепло при этом уходит на фазовый переход части жидкости, тем самым увеличивая давление в газовой подушке. «Ролловер»

может повторяться последовательно несколько раз. Такой неконтролируемый рост давления может привести к повреждению хранилища и самой системы заправки. Основным способом предотвращения «ролловера» является обеспечение однородного распределения плотности и состава по хранилищу за счет предотвращающего «ролловер» заполнения и с помощью контроля однородности распределения СПГ в хранилище;

- пары природного газа могут иметь как положительную, так и отрицательную плавучесть: граница нейтральной плавучести – минус 110°C;

- в силу большой разницы температур жидкой фазы СПГ и подстилающей поверхности имеет место сильная зависимость интенсивности кипения от разности температур СПГ и подстилающей поверхности, твердой и жидкой (вода); при начальной стадии пролива, пока существует большая разница температур и при этом поверхность еще не охладилась, имеет место пленочный режим кипения СПГ, когда между поверхностью и СПГ существует паровая «подушка», формирующаяся в начальные моменты времени и лимитирующая подвод тепла. По мере охлаждения поверхности и разности температур в проливе имеет место контакт жидкой фазы с подстилающей поверхностью и, как следствие, увеличение теплообмена между ними (пузырьковый режим кипения);

- низкая вязкость позволяет СПГ легко растекаться тонким слоем;

- большие объемы хранения СПГ создают угрозу появления больших и долго существующих облаков ТВС. В этом случае при попадании в облако строений с внутренними помещениями возможна инфильтрация (проникновение) ТВС внутрь этих помещений, что при иницировании процессов горения во внутренних помещениях влечет за собой внутренний взрыв (сгорание ТВС в замкнутом объеме с повышением давления, разрушением и выбросом сильно турбулизированных продуктов). Такой внутренний взрыв является мощным источником иницирования взрывного горения в основном (большом) облаке с повышенной скоростью горения и интенсивным образованием волн давления;

- плотность СПГ (в зависимости от состава и давления 410-500 кг/м³) меньше плотности воды и поэтому жидкий СПГ может находиться на поверхности воды и дрейфовать;

- температура самовоспламенения метана 545°С, что исключает самовоспламенение смеси метана с воздухом и делает возможным зажигание такой смеси только при наличии источника зажигания;

- высокая кратность образования пара из единицы жидкого объема – 600 крат;

- низкая температура и высокая кратность парообразования СПГ делают возможным возникновение «физического взрыва» при контакте (смешении) жидкого СПГ с имеющими существенно большую температуру объектами окружающей среды; такой контакт (смешение) приводит к быстрому фазовому переходу СПГ в пар и образованию вследствие этого воздушных ударных волн и волн давления; наиболее интенсивно быстрый фазовый переход протекает при контакте (смешении) с водой;

- в изотермических хранилищах при небольшом избыточном давлении паровой фазы в случае истечения при разрушении корпуса скорость выброса будет определяться гидростатическим давлением от столба жидкости над уровнем отверстия разрушения. При такой ситуации газ снаружи от места разрушения будет проникать внутрь объема в виде пузырьков через отверстие разрушения и при подъеме в верхнюю часть резервуара скапливаться там. Если истечение происходит в атмосферу, то в емкость будет проникать воздух, тем самым внутри резервуара может образоваться ТВС. Наиболее опасным исходом такой ситуации является внутренний (в объеме изотермического хранилища) взрыв при иницировании через отверстие разрушения и истечения при опускании уровня жидкости в резервуаре до уровня этого отверстия, что возможно при появлении горения снаружи резервуара (зажигании пролива снаружи, горение облаков ТВС снаружи).

Основные поражающие факторы аварий на ОПО СПГ следующие:

- охрупчивание конструкций, не рассчитанных специально на криогенное воздействие;
- быстрый фазовый переход (физический взрыв) с образованием воздушных волн сжатия;
- тепловое излучение и контакт с пламенем при горении проливов СПГ (и других углеводородов);
- тепловое излучение и удар пламени при горении факелов;
- огненные шары расширяющихся вскипающих жидкостей BLEVE (при каскадном разрушении одностенных емкостей без вакуумированных и (или) теплоизолированных стенок и полуизотермических двухоболочечных резервуаров);
- волны давления и контакт с пламенем при горении облаков ТВС;
- волны давления (и разлетающиеся осколки) от внутренних взрывов;
- криогенное поражение человека (ожог);
- удушье человека при снижении концентрации кислорода в протяженных облаках;
- осколки прежде всего при разлете фрагментов оборудования сжатого газа.

На крупнотоннажных ОПО СПГ рекомендуется применять следующие виды изотермических резервуаров:

- двустенные (двухоболочечные с полной герметизацией) изотермические резервуары, которые включают самонесущий внутренний резервуар (выполненный из криогенной хладостойкой стали) с подвесным перекрытием и внешний резервуар с купольным перекрытием, изготовленный из предварительно напряженного железобетона с герметизирующей облицовкой внутренних стенок и днища хладостойкой сталью. Для изотермических резервуаров СПГ объемом хранения до 60 000 м³ включительно допускается выполнение внешнего резервуара из криогенной хладостойкой стали. Независимо от конструктивного исполнения внешний резервуар предназначен

для обеспечения полного удержания СПГ и безопасного сброса его паров при авариях, связанных с нарушением целостности внутреннего резервуара;

- мембранные изотермические резервуары, которые состоят из нескольких слоев: внутреннего слоя из гофрированного листа нержавеющей стали, контактирующего с СПГ; промежуточной многослойной изоляции из фанеры, усиленной пенополиуретаном и триплексом; внешней оболочки из армированного бетона.

При разгерметизации гофрированного листа предполагается, что остальные слои обеспечат герметичность мембранного резервуара. Внешняя оболочка из армированного бетона обеспечивает устойчивость к внутренним и внешним нагрузкам, а гидроизолирующий слой предотвращает попадание влаги в резервуар.

Современные проектируемые изотермические и полуизотермические резервуары, оснащенные двумя барьерами (оболочками), способны сохранять целостность и не давать выходить жидкой фазе СПГ за пределы собственно емкости при всех вариантах эксплуатации. Разрушение таких резервуаров с выходом жидкой фазы СПГ возможно только при возникновении взрывных (включая ударные) нагрузок нерасчетного характера (террористические акты, военные действия, падения метеоритов). При исключении таких воздействий путем соответствующих мер безопасности допускается не рассматривать при количественной оценке риска сценарий полного разрушения резервуара и аварийного выброса жидкой фазы СПГ в ОС.

При авариях без выхода жидкой фазы предполагается, что жидкая фаза СПГ после разрушения внутренней оболочки или емкости остается в теплоизолирующем слое, испаряется, а образовавшиеся пары выходят через предохранительный клапан.

Специфика развития аварий с СПГ на малотоннажных производствах определяется технологией обращения СПГ в полуизотермическом режиме обращения под давлением (давление, как правило, до 1,2 МПа, температура выше температуры кипения при 0,1 МПа).

Полуизотермические резервуары по конструктивному исполнению подразделяются на:

- двухоболочечный резервуар СПГ с термоизоляционным кожухом, предназначенным для обеспечения вакуумной изоляции, и при разгерметизации внутреннего сосуда удерживающим в межстенном пространстве жидкую фазу СПГ с контролируемым сбросом паров СПГ в атмосферу;

- резервуар СПГ в термоизоляционном кожухе, предназначенном для обеспечения вакуумной изоляции и обеспечивающим, при разгерметизации внутреннего сосуда, истечение СПГ непосредственно в ограждение резервуара только через специально предназначенное для этого устройство, установленное на кожухе.

В соответствии с нормативными требованиями безопасности для дополнительного ограничения распространения жидкой фазы при разрушении полуизотермического резервуара такие резервуары оснащаются внешней оболочкой (кожухом), которая в свою очередь может заполняться пористой средой и (или) герметизироваться газонепроницаемой крышкой, а также системой сброса паров СПГ.

Приложение № 4
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённого приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 257

Пример деревьев отказов для аварий на ОПО СПГ

Пример дерева всех возможных отказов для типового оборудования на ОПО СПГ при анализе событий, предшествующих аварийному выбросу опасных веществ (инциденту, аварии), приведен на рисунке 4-1.

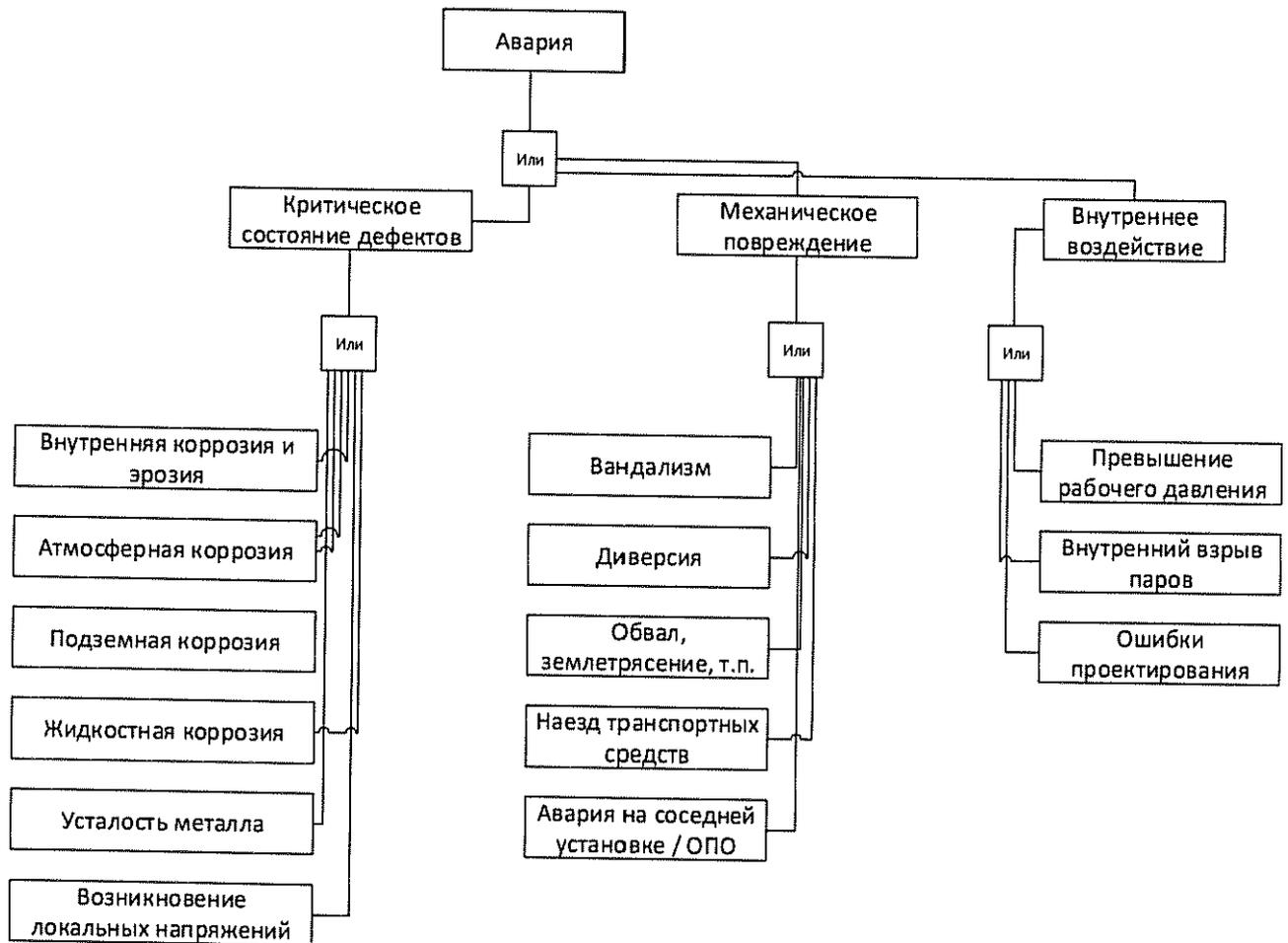


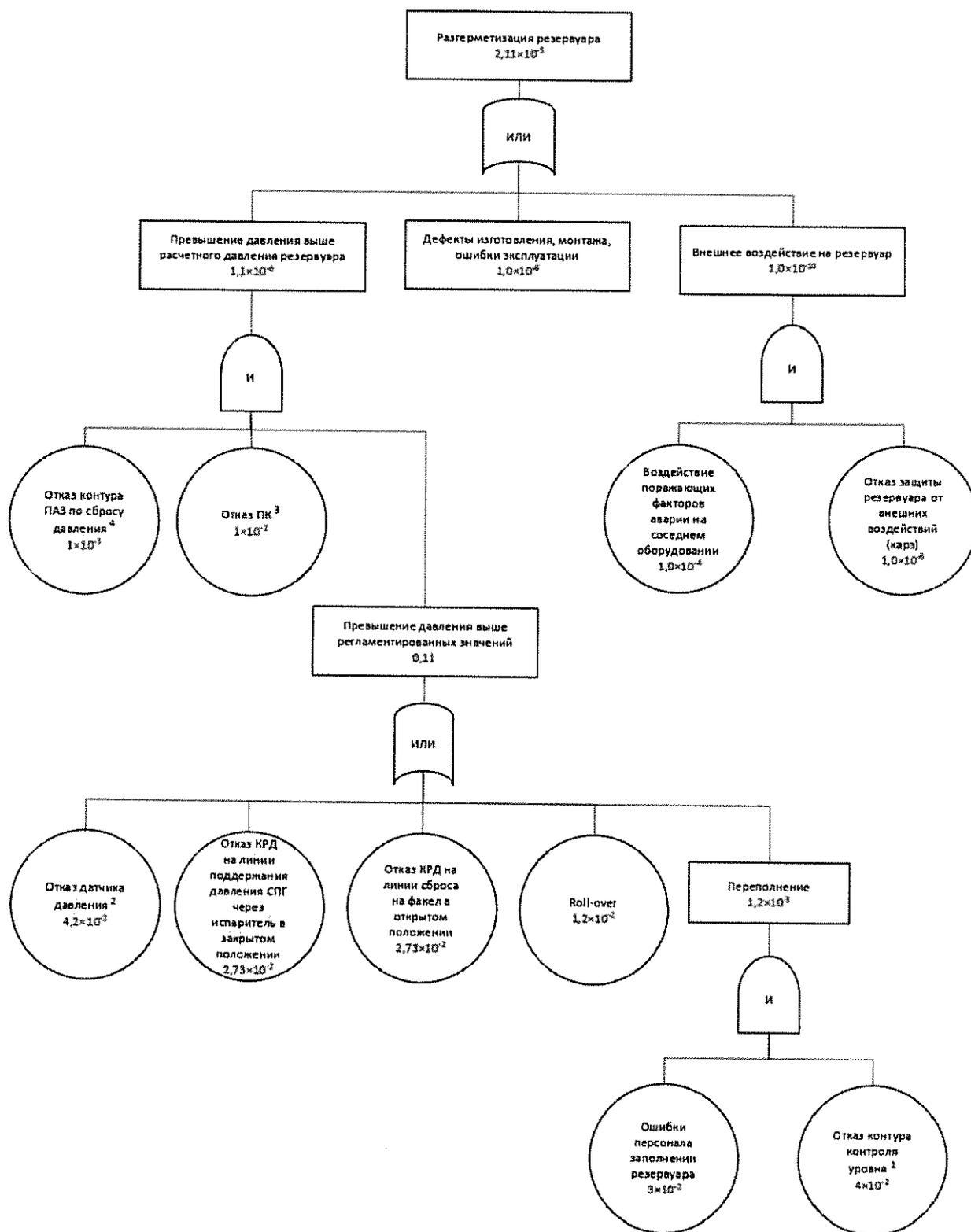
Рисунок 4-1. Обобщенное дерево отказов для анализа причин разгерметизации оборудования на ОПО СПГ

Пример дерева отказов для полуизотермического одностенного (с вакуумной изоляцией) горизонтального резервуара хранения СПГ приведен на рисунке 4-2. При построении дерева отказов, в качестве простейшего примера, учитывалось, что резервуар хранения СПГ оснащен только одним контуром контроля уровня, давления, одним предохранительным клапаном, также считалось, что повышению давления вследствие увеличения температуры в резервуаре под воздействием высоких температур окружающей среды невозможно, по причине наличия термоизоляционного кожуха, небольшие локальные повреждения данного кожуха не влияют на его теплоизоляционную способность, а полное его разрушение практически невероятным событиям, которые не учитываются при построении дерева отказов. Также при построении дерева отказов считалось, что внутренний резервуар хранения СПГ выполнен из стали, устойчивой к воздействиям криогенных температур и охрупчивание стали в процессе эксплуатации резервуара не происходит.

Приведенное в примере дерево отказов является простейшим, модельным. При его построении учитывались данные из открытых источников⁵. При построении реального дерева отказов необходимо уточнять количество начальных событий в каждом срезе дерева отказов, которое будет зависеть от проектных решений для каждого конкретного резервуара, а также необходимо уточнять, с приведением источников, используемые частоты отказов.

⁵ Geun Woong Yun. Bayesian-LOPA methodology for risk assessment of An LNG importation terminal. A Thesis. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. December, 2007. 288 p.

Hyo Kim, Jae-Sun Koh, Youngsoo Kim and Theofanius G. Theofanous. Risk Assessment of Membrane Type L NG Storage Tanks in Korea-based on Fault Tree Analysis. Korean Journal of chemical engineering, 22 (1), 1-8 (2005).



Сокращения: КРД – клапан-регулятор давления;
 ПК – предохранительный клапан.

Рисунок 4-2. Пример дерева отказов для резервуара хранения СПГ

Примечания к дереву отказов, приведенному на рисунке 4-2:

1. Количество начальных событий «отказ контура контроля уровня» и их логические связи между собой зависят от конкретного количества контуров контроля уровня на резервуаре, вида и уровня их резервирования. Частота отказов контура контроля уровня зависит от того, как он реализован в системе ПАЗ или в АСУТП. При реализации данного контура в системе ПАЗ частота отказов зависит от принятого уровня полноты безопасности (УПБ, SIL) в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования», утверждённом и введённом в действие приказом Росстандарта от 29 октября 2012 г. № 586-ст, и ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018 «Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 1. Термины, определения и технические требования», утверждённом и введённом в действие приказом Росстандарта от 8 августа 2018 г. № 466-ст. При реализации данного контура в системе АСУТП частоты отказов определяются по справочным данным. В данном примере контур контроля уровня реализован в системе АСУТП.

2. Количество начальных событий «отказ датчика давления» и их логические связи между собой зависят от конкретного количества датчиков давления на резервуаре и их мажоритарности.

3. Количество начальных событий «отказ ПК» зависит от количества ПК на резервуаре с учетом ПК в «горячем резерве».

4. При отсутствии на резервуаре контура ПАЗ по увеличению давления начальное событие «отказ контура ПАЗ по превышению давления» необходимо исключить. Частота отказов контура ПАЗ по превышению давления зависит от принятого уровня полноты безопасности (УПБ, SIL) в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования», утверждённом и введённом в действие приказом Росстандарта от 29 октября 2012 г. № 586-ст,

и ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018 «Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 1. Термины, определения и технические требования», утверждённом и введённом в действие приказом Росстандарта от 8 августа 2018 г. № 466-ст. В указанном примере консервативно принят SIL2.

Приложение № 5
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённого приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 251

Примеры типовых сценариев аварий на ОПО СПГ

Примеры типовых сценариев аварий на ОПО СПГ приведены в таблице ниже.

Пример типовых сценариев аварий на ОПО СПГ

Таблица № 5-1

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
Сценарии развития аварии при хранении		
Схран1 «Разрушение внутренней оболочки изотермического резервуара с двумя барьерами безопасности»	Разрушение внутреннего резервуара изотермического хранилища с двумя барьерами безопасности → поступление жидкого продукта в межстенное пространство с теплоизоляцией → распространение жидкой фазы в межстенном пространстве, испарение и образование паров, захлаживание конструктивных элементов и материалов → фильтрация паров в межстенном пространстве → выход паров через предохранительный клапан, формирование струйного шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, снижение концентрации кислорода, воздействие низкой температуры, если возможно – инфильтрация (проникновение) в помещение → сгорание облака ТВС, факельное горение на предохранительном клапане, при наличии инфильтрованных объемов – локальные внутренние взрывы, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов.	Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Воздействие волн давления.
Схран2 «Разрушение оболочки»	Разрушение резервуара → поступление жидкого СПГ в атмосферу → проникновение воздуха внутрь резервуара и образование внутри ТВС → формирование пролива в	Криогенное воздействие. Снижение

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
изотермического резервуара с одним барьером безопасности»	прямках, обваловании, кольцевой стенке → интенсивное кипение пролива и образование паров СПГ, захлаживание конструктивных элементов и материалов → формирование от пролива шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, снижение концентрации кислорода, воздействие низкой температуры, инфильтрация в находящиеся на пути дрейфа помещения → при появлении источника зажигания сгорание облака ТВС, горение пролива, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов → при опускании уровня жидкого СПГ до уровня отверстия разрушения, проникновение открытого пламени внутрь резервуара → внутренний взрыв в резервуаре, разрушение резервуара, выброс оставшегося жидкого СПГ и неконтролируемый разлив на прилегающих территориях → интенсивное испарение, горение облака и пожар пролива.	концентрации кислорода. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Воздействие волн давления. Разлет фрагментов резервуара, защитных конструкций, гидродинамическая волна горячей жидкости.
Схран3 «Полное разрушение хранилища под давлением» (в том числе полуизотермического хранилища СПГ)	Разрушение хранилища под давлением → выброс ГФ и ЖФ → вскипание перегретой ЖФ, дополнительное образование ГФ и аэрозолей → при наличии источника зажигания огненный шар (BLEVE ⁶) → в отсутствие источника зажигания формирование облака ТВС, пролив ЖФ в обвалование или за его пределы → испарение пролива → при появлении источника зажигания воспламенение и сгорание облака ТВС, горение пролива.	Разлет фрагментов технологического оборудования. Ударная волна. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Токсичные продукты сгорания от вторичных пожаров. Криогенное воздействие. (При полуизотермическом хранении СПГ)
Схран4 «Частичное разрушение хранилища под	Разгерметизация хранилища под давлением → вскипание перегретой ЖФ, дополнительное образование ГФ и (при выбросе в атмосферу) аэрозолей → при	Разлет фрагментов технологического оборудования.

⁶ Взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE) – совокупность явлений, сопровождающих внезапное разрушение резервуара хранения со сжиженным природным газом при наличии источника зажигания, со вскипанием жидкости и образованием воздушной ударной волны, осколочного поля, мгновенным воспламенением парового облака с образованием огневого шара.

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
<p>давлением» (в том числе при одновременном разрушении внутренней и внешней оболочки (кожуха) полуизотермического хранилища СПГ)</p>	<p>разрушении выше уровня жидкости истечение ГФ, при разрушении ниже уровня жидкости истечение двухфазной среды → формирование облака ТВС, пролив ЖФ в обвалование или за его пределы → испарение пролива → при появлении источника зажигания воспламенение и сгорание облака ТВС, горение пролива, образование горящих факелов. → при попадании не до конца опорожненной емкости с ЖФ в зону действия пожара пролива и длительном воздействии – образование ОШ⁷.</p>	<p>Ударная волна. Воздействие волн давления при сгорании облака ТВС. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Криогенное воздействие. (При полуизотермическом хранении СПГ)</p>
<p>Схран5 «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического двухоболочечного хранилища СПГ»</p>	<p>Разрушение внутренней оболочки полуизотермического хранилища → поступление жидкого продукта в межстенное пространство с теплоизоляцией → распространение жидкой фазы в межстенном пространстве, испарение и образование паров, захлаживание конструктивных элементов и материалов → фильтрация паров в межстенном пространстве → выход паров через предохранительный клапан, формирование струйного шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, воздействие низкой температуры, → сгорание облака ТВС, факельное горение на предохранительном клапане, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов → в случае недостаточной способности сброса через клапан рост давления и разрушение внешней оболочки → истечение СПГ наружу, в обвалование → при наличии стационарной системы предотвращения пожара (ССПП) в обваловании и интенсивности истечения, соответствующей ее пропускной способности, сброс газовой фазы и дренаж жидкой → при отсутствии ССПП, или недостаточной ее пропускной способности, пролив в обвалование или за его пределы → формирование пролива → интенсивное кипение пролива и образование</p>	<p>Криогенное воздействие. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Воздействие волн давления.</p>

⁷ для определения максимальных зон поражения от ОШ следует рассматривать максимальное заполнение хранилища, а при проведении анализа риска - весь спектр состояний хранилища (аналогично для сценариев Схран5, Схран6)

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>паров СПГ, захлаживание конструктивных элементов и материалов → формирование от пролива шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, воздействие низкой температуры → при появлении источника зажигания сгорание облака ТВС, горение пролива, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов → при попадании не до конца опорожненной емкости с ЖФ в зону действия пожара пролива и длительном воздействии - образование ОШ.</p>	
<p align="center">Схранб «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического хранилища СПГ в кожухе»</p>	<p>Разрушение внутренней оболочки полуизотермического хранилища → поступление жидкого продукта в межстенное пространство с теплоизоляцией → распространение жидкой фазы в межстенном пространстве, испарение и образование паров, захлаживание конструктивных элементов и материалов → сброс жидкой фазы из кожуха в обвалование → в случае недостаточной способности сброса через клапан рост давления – разрушение внешней оболочки → попадание СПГ в обвалование → при наличии ССПП в обваловании и интенсивности истечения, соответствующей ее пропускной способности, сброс газовой фазы и дренаж жидкой → при отсутствии ССПП, или недостаточной ее пропускной способности, пролив в обвалование или за его пределы → формирование пролива → интенсивное кипение пролива и образование паров СПГ, захлаживание конструктивных элементов и материалов → формирование от пролива шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, воздействие низкой температуры → при появлении источника зажигания сгорание облака ТВС, горение пролива, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов → при попадании не до конца опорожненной емкости с ЖФ в зону действия пожара пролива и длительном воздействии – образование ОШ.</p>	<p>Криогенное воздействие.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Воздействие волн давления.</p>
<p align="center">Схран7 Разрушение изотермического или</p>	<p>Разрушение резервуара → интенсивное кипение пролива и образование паров СПГ со всей площади зеркала жидкости в резервуаре (для полуизотермических резервуаров выброс ГФ и вскипание перегретой ЖФ,</p>	<p>Криогенное воздействие.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
полуизотермического резервуара, выполненного в заглубленном или подземном исполнении ⁸	дополнительное образование ГФ и аэрозолей) → формирование от зеркала жидкости в резервуаре шлейфа в окружающей среде, образование облака ТВС → рассеяние паров, снижение концентрации кислорода, воздействие низкой температуры, инфильтрация в находящиеся на пути дрейфа помещения → при появлении источника зажигания сгорание облака ТВС, горение зеркала жидкости в резервуаре, воздействие теплового излучения, волн давления, горячих продуктов.	Тепловое излучение от пламени. Воздействие волн давления.
Сценарии развития аварии для оборудования с жидкой и (или) газовой фазой (в том числе СПГ), включая насосное и компрессорное оборудование		
С_{об1} «Полное разрушение оборудования с жидкой и (или) газовой фазой (в том числе СПГ)»	Разрушение единицы оборудования → выброс ГФ и ЖФ → вскипание перегретой ЖФ, дополнительное образование ГФ и аэрозолей → формирование облака ТВС, пролив ЖФ в обвалование или за его пределы → дополнительный теплообмен в оборудовании и дополнительное парообразование → поступление ГФ и ЖФ от смежных блоков → вскипание перегретой ЖФ, поступившей от смежных блоков, и поступление оставшейся ЖФ в пролив → испарение (кипение) пролива → при появлении источника зажигания воспламенение и сгорание облака ТВС, горение пролива, образование горящих факелов на подводных коммуникациях (трубопроводах), в случае дополнительного поступления ЖФ или ГФ от смежных блоков → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.	Разлет фрагментов технологического оборудования. Ударная волна. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени.
С_{об2} «Частичное разрушение оборудования с жидкой и (или) газовой фазой	Разгерметизация единицы оборудования или частичное разрушение трубопровода → выброс ГФ и (или) ЖФ → вскипание перегретой ЖФ, дополнительное образование ГФ и аэрозолей → формирование облака ТВС, пролив ЖФ в обвалование или за его пределы →	Разлет фрагментов технологического оборудования. Ударная волна.

⁸ Уровень жидкости в хранилище находится ниже уровня земли.

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
(в том числе СПГ)»	протекание дополнительных реакций с выделением тепла и дополнительное парообразование → испарение пролива → при появлении источника зажигания воспламенение и сгорания облака ТВС, горение пролива, образование горящих факелов → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.	Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени.
Сценарии развития аварии при транспортировке по надземным трубопроводам		
Струб1 «Разрыв газопроводов»	Разрушение технологического газопровода; повреждение или разрушение близлежащих конструкций; формирование, ускорение и разлет осколков (фрагментов) → расширение и истечение газа из разрушенного участка с образованием УВ в момент разрыва → при немедленном зажигании возникновение горящих струй (факелов); высокоскоростных – при отсутствии препятствий (встречных потоков) или низкоскоростных – при наличии на пути потоков препятствий (встречных потоков) → рассеивание истекающего газа, формирование облака ТВС → попадание персонала объекта, зданий, сооружений, технологического оборудования объекта в зону барического, осколочного воздействия, скоростного напора струи (струй) → воспламенение с отсрочкой истекающего газа и сгорание облака ТВС с последующим образованием горящих струй (факелов); высокоскоростных – при отсутствии препятствий (встречных потоков) или низкоскоростных – при наличии на пути потоков препятствий (встречных потоков) → образование волн давления при сгорании объемов ТВС; прямое (контакт с горячими продуктами) и радиационное термическое воздействие горящих факелов, а также воздействие осколков и волн давления на технологическое оборудование, здания и сооружения, а также на людей → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на	Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением. Ударная волна. Динамический напор скоростных потоков газа. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени.

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие углеводородные газы и горючие жидкости, с распространением и действием поражающих факторов за пределами объекта, в том числе загрязнение окружающей среды → отсечение аварийного участка срабатывание, систем пожаротушения, выгорание выброса, прекращение аварии.</p>	
<p>Струб2 «Разрыв трубопроводов с жидкой фазой под давлением»</p>	<p>Разрушение технологического трубопровода; сброс давления на месте разрушения; при транспортировке нестабильной жидкости – вскипание выброса и диспергирование → истечение жидкой (при напорном истечении частично диспергированной) или двухфазной среды → при немедленном зажигании возникновение горящих струй или струи (факелов или факела) – для напорного истечения стабильной жидкой среды или для вскипевшего двухфазного потока; при отсутствии струи или неполном прогорании в струе – образование горящих проливов → при отсутствии немедленного воспламенения формирование аэрозольно-газового шлейфа ТВС в атмосфере и пролива → рассеивание облака ТВС; растекание, кипение и испарение пролива → воспламенение с отсрочкой и сгорание облака ТВС с последующим образованием горящих струй (факелов) и (или) пролива; → образование волн давления при сгорании объемов ТВС; прямое (контакт с горячими продуктами) и радиационное термическое воздействие горящих факелов, а также волн давления на технологическое оборудование, здания и сооружения, а также на людей → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие углеводородные газы и горючие жидкости, с распространением и действием поражающих факторов за пределами объекта, в том числе загрязнение окружающей среды → отсечение аварийного участка срабатывание, систем пожаротушения, выгорание выброса, прекращение аварии.</p>	<p>Ударная волна. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
<p style="text-align: center;">Струб3 «Разрыв трубопроводов с жидкой фазой СПГ с изолирующим внешним трубопроводом»</p>	<p>1. Разрушение внутреннего трубопровода при сохранении целостности наружного (изолирующего) трубопровода → попадание жидкого СПГ в межтрубное пространство, переход его в паровую фазу и ее распространение по межтрубному объему → при срабатывании системы продува, сброса паров на факельную систему и успешном отсечении аварийного участка (ближайшими или иными задвижками) – рассеяние с факела, снижение в окружающей среде концентрации кислорода, воздействие низкотемпературных паров на прилегающие площади (конструкции), если возможно – инфильтрация в находящиеся на пути дрейфа помещения; при появлении источника зажигания воспламенение и горение облака ТВС, горение на факельной системе → при отказе системы продува (сброса) паров на факельную систему или невозможности отсечения аварийного участка – накопление паров в межтрубном пространстве с последующим нарастанием давления и разрушением внешнего трубопровода → рассеяние паров с места разрушения внешнего трубопровода → снижение в окружающей среде концентрации кислорода, воздействие низкотемпературных паров на прилегающие площади (конструкции), если возможно – инфильтрация в находящиеся на пути дрейфа помещения → при появлении на пути шлейфа источника зажигания воспламенение и горение облака ТВС, горение струи на месте выхода газовой фазы из внешней трубы; тепловое воздействие излучения и горячих продуктов, волн давления, при наличии в зоне открытого пламени объемов с инфильтрованными парами СПГ вторичные взрывы с генерацией осколков и ударных волн → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p> <p>2. Разрушение внутреннего и внешнего</p>	<p>Ударная волна. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>трубопроводов → напорное или безнапорное истечение жидкого СПГ → отсечение аварийного участка (ближайшими или иными задвижками) → появление на месте выброса источника зажигания → при сохранении напора образование горящего факела, в отсутствие напора при истечении – горение пролива; тепловое воздействие излучения и горячих продуктов → при отсутствии на месте выброса источника зажигания образование в результате диспергирования (при наличии напора) аэрозольного шлейфа в атмосфере и пролива, кипение и испарение пролива → рассеяние шлейфа → снижение в окружающей среде концентрации кислорода, воздействие низкотемпературных паров на прилегающие площади и(или) конструкции, если возможно – инфильтрация в находящиеся на пути дрейфа помещения → при появлении на месте выброса источника зажигания → воспламенение и горение облака ТВС воздействие волн давления; горение струи на месте выброса СПГ (при наличии напора в истечении) и пролива; тепловое воздействие излучения и горячих продуктов; при наличии в зоне открытого пламени объемов с инфильтрованным СПГ (включая внутренний объем трубопровода) вторичные взрывы с генерацией осколков и ударных волн → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	
Сценарии развития аварии на подводном газопроводе		
<p style="text-align: center;">С_{пг1} «Полный разрыв подводного трубопровода на глубокой воде»</p>	<p>Полный разрыв подводного газопровода на глубокой воде → подводная волна избыточного давления → разлет осколков трубы и фрагментов бетонировки, грунта → истечение струй газа в воду, образование газовых пузырей, их дробление с образованием жидкостно-пузырьковой смеси, их дрейф в поле водного течения и выход этой водно-мелкопузырьковой смеси на поверхность с образованием опасных для судоходства зон → рассеяние вышедшего</p>	<p>Волна давления в водной среде. Снижение плавучести в водно-пузырьковой среде. Рассеяние опасных веществ. Прямое воздействие пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>газа в атмосфере → при появлении источника зажигания воспламенение облака ТВС, сгорание облака, формирование очага горения на месте выхода газа на поверхность → термическое воздействие пожара (излучение, пламя, горячие продукты горения) на расположенные поблизости плавучие объекты, а также на находящиеся на них людей → разрушение или повреждение судов, их оборудования и, возможно, имущества третьих лиц и компонентов природной среды на берегу), гибель или получение людьми ожогов различной степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>Тепловое излучение от пламени. Волны давления.</p>
<p style="text-align: center;">Снг2 «Пожар колонного типа в морской акватории при аварии на небольшой глубине при интенсивном истечении»</p>	<p>Разрыв подводного газопровода на небольшой глубине → образование первичной подводной волны сжатия за счет расширения газа в жидкости → разлет осколков трубы и фрагментов бетонировки, грунта → существенное нарушение целостности водной массы, образование крупных газовых полостей → формирование колонного низкоскоростного потока газа, выход газа в атмосферу в виде «колонного» шлейфа → при появлении на месте выброса источника зажигания воспламенение истекающего газа с образованием «столба» пламени в форме, близкой к цилиндрической → термическое воздействие пожара на расположенные поблизости плавучие объекты, а также на находящиеся на них людей → разрушение или повреждение судов, их оборудования и, возможно, имущества третьих лиц и компонентов природной среды и компонентов природной среды на берегу, гибель или получение людьми (экипажем плавучих объектов и, возможно, населением) ожогов различной степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны, осколков → снижение интенсивности истечения, переход</p>	<p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением. Ударная волна, в том числе в водной среде. Образование крупных газовых полостей, волн. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Волны давления.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	развития к сценарию С _{пг4} → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.	
<p align="center">С_{пг3} «Струевые пламена в морской акватории при аварии на небольшой глубине при интенсивном истечении»</p>	<p>Разрыв подводного газопровода на небольшой глубине → образование первичной подводной волны сжатия за счет расширения газа в жидкости → вырывание из грунта плетей разрушенного газопровода (характерно для газопроводов в слабонесущих грунтах) → разлет осколков трубы и фрагментов бетонировки, грунта → существенное нарушение целостности водной массы, образование крупных газовых полостей → истечение газа из газопровода в виде двух независимых высокоскоростных струй, выход газа в атмосферу в виде струевых шлейфов → при появлении на месте выброса источника зажигания воспламенение истекающего газа с образованием двух наклонных (вверх) струй пламени → термическое воздействие пожара на расположенные поблизости плавучие объекты, а также на находящиеся на них людей → разрушение или повреждение судов, их оборудования и, возможно, имущества третьих лиц и компонентов природной среды и компонентов природной среды на берегу, гибель или получение людьми (экипажем плавучих объектов и, возможно, населением) ожогов различной степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны, осколков → снижение интенсивности истечения, переход развития к сценарию С_{пг5} → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением.</p> <p>Ударная волна, в том числе в водной среде.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Волны давления.</p>
<p align="center">С_{пг4} «Рассеивание»</p>	<p>Разрыв подводного газопровода на небольшой глубине → образование первичной подводной волны сжатия за счет</p>	<p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
<p>низкоскоростного шлейфа газа над морской акваторией (при аварии на небольшой глубине при невысокой интенсивности истечения)»</p>	<p>расширения газа в жидкости → разлет осколков трубы и фрагментов бетонировки, грунта → формирование пульсирующего потока газа, истечение газа из трубопровода в виде отдельных крупных всплывающих и дробящихся пузырей, выход газа в атмосферу в виде череды залповых выбросов → рассеивание вышедшего в атмосферу газа → при появлении на месте выброса источника зажигания воспламенение рассеивающегося газа с образованием горящих облаков (облака) → термическое воздействие пожара на расположенные поблизости плавучие объекты, а также на находящиеся на них люди → разрушение или повреждение судов, их оборудования и, возможно, имущества третьих лиц, компонентов природной среды и компонентов природной среды на берегу, гибель или получение людьми (экипажем плавучих объектов и, возможно, населением) ожогов различной степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны, осколков → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>технологического оборудования под давлением.</p> <p>Ударная волна, в том числе в водной среде.</p> <p>Образование крупных газовых пузырей, волн.</p> <p>Снижение плавучести в водно-пузырьковой среде</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Волны давления</p>
<p>Снг5 «Рассеивание низкоскоростного шлейфа газа над морской акваторией, две струи газа (при аварии на небольшой глубине при невысокой интенсивности истечения)»</p>	<p>Разрыв подводного газопровода на небольшой глубине → образование первичной подводной волны сжатия за счет расширения газа в жидкости → разлет осколков трубы и фрагментов бетонировки, грунта → формирование пульсирующих струевых потоков газа, истечение газа из трубопровода в виде двух всплывающих и дробящихся струй, выход газа в атмосферу в виде пульсирующих газовых потоков → рассеивание вышедшего в атмосферу газа → при появлении на месте выброса источника зажигания воспламенение рассеивающегося газа с образованием горящих облаков, облака, очагов горения у поверхности → термическое воздействие пожара на расположенные поблизости плавучие</p>	<p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением.</p> <p>Ударная волна, в том числе в водной среде.</p> <p>Снижение плавучести в водно-пузырьковой среде</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>объекты, а также на находящихся на них людей → разрушение или повреждение судов, их оборудования и, возможно, имущества третьих лиц, компонентов природной среды и компонентов природной среды на берегу, гибель или получение людьми (экипажем плавучих объектов и, возможно, населением) ожогов различной степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны, осколков → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	
Сценарии развития аварии на ПРГУ		
<p style="text-align: center;">С_{пргу1} «Разрыв трубопровода перекачки СПГ с танкера на регазификационное судно»</p>	<p>Разрыв трубопровода СПГ → пролив на водную поверхность → растекание СПГ с интенсивным кипением, испарением пролива; интенсивный переход жидкого СПГ в пар («физический взрыв»), дрейф пролива по акватории → распространение парогазового облака над окружающей территорией, постепенное перемешивание его с воздухом → образование взрыво- и пожароопасных концентраций природного газа → при появлении источника зажигания дефлаграционный взрыв облака, горение пролива, истекающего на месте пролива жидкого СПГ → повреждение плавсредств и объектов инфраструктуры, их оборудования (включая ПРГУ) → поражение людей воздушной волной сжатия, криогенной средой, термическим воздействием, асфиксия вследствие попадания в пары СПГ или продукты горения → загрязнение атмосферы продуктами горения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>Криогенное воздействие</p> <p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением.</p> <p>Ударная волна от физического взрыва и от сгорания облака ТВС.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p>
<p style="text-align: center;">С_{пргу2}</p>	<p>Разрушение емкостного оборудования на</p>	<p>Криогенное</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
<p>«Разрушение емкостного оборудования с СПГ (в том числе изотермического танка) ниже ватерлинии с выбросом под воду»</p>	<p>наружной установке; образование отверстия ниже ватерлинии → выброс СПГ под воду, смешение СПГ с водой, интенсивное испарение СПГ, переход жидкого СПГ в паровую фазу («физический взрыв»), теплообмен образовавшихся паров с водой, их нагрев → выход СПГ (жидкой фазы и пара) в атмосферу, формирование пролива на водной поверхности → дрейф пролива по акватории, испарение пролива → распространение парогазового облака над окружающей территорией, если возможно – инфильтрация во внутренние помещения, постепенное перемешивание паров с воздухом → образование взрыво- и пожароопасных концентраций природного газа → при появлении источника зажигания дефлаграционный взрыв облака, горение пролива → повреждение плавсредств и объектов инфраструктуры, их оборудования (включая ПРГУ) → поражение людей воздушной волной сжатия, криогенной средой, термическим воздействием, асфиксия вследствие попадания в пары СПГ или продукты горения → загрязнение атмосферы продуктами горения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>воздействие</p> <p>Ударная волна от физического взрыва и от сгорания облака ТВС.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p>
<p>С_{пргу3}</p> <p>«Разрушение емкостного оборудования с СПГ (в том числе изотермического танка) с выбросом в атмосферу»</p>	<p>Разрушение емкостного оборудования на наружной установке → выброс СПГ в атмосферу → формирование пролива СПГ на борту ПРГУ, затекание в замкнутые или полузамкнутые объемы, выход СПГ (жидкой фазы и пара) в атмосферу, формирование пролива на водной поверхности с дрейфом пролива по акватории → интенсивное кипение и переход жидкого СПГ в пар, при контакте с водой – «физический взрыв» → распространение парогазового облака над окружающей территорией, инфильтрация во внутренние помещения, постепенное перемешивание его с воздухом → образование взрыво- и пожароопасных</p>	<p>Криогенное воздействие</p> <p>Ударная волна от физического взрыва и от сгорания облака ТВС.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	<p>концентраций природного газа → при появлении источника зажигания дефлаграционный взрыв облака, горение пролива → повреждение плавсредств и объектов инфраструктуры, их оборудования (включая ПРГУ) → поражение людей воздушной волной сжатия, криогенной средой, термическим воздействием, асфиксия вследствие попадания в пары СПГ или продукты горения → загрязнение атмосферы продуктами горения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	
<p>Спрт4 «Разрушение надземного трубопровода»</p>	<p>Разрыв надземного (надводного) технологического газопровода → истечение газа из разрушенного участка с образованием УВ в момент разрыва → полное разрушение ограждающих конструкций → разлет осколков конструкций и фрагментов трубы → истечение газа из газопровода в виде двух независимых высокоскоростных струй → при наличии источника зажигания воспламенение истекающего газа с образованием двух горизонтальных струй пламени (факелов) → несрабатывание или безуспешная отработка систем пожаротушения → прямое радиационное термическое воздействие пожара на технологическое оборудование, здания и сооружения, а также на людей → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта → разрушение или повреждение оборудования, зданий и сооружений на объекте и, возможно, имущества третьих лиц, компонентов природной среды за пределами объекта, гибель или получение людьми (персоналом и, возможно, населением) ожогов различной</p>	<p>Разлет фрагментов трубопроводов и другого технологического оборудования под давлением.</p> <p>Ударная волна.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	степени тяжести, а также травм от воздействия ударной волны, осколков.	
Сценарии развития аварии на ОГТ, на производстве		
<p style="text-align: center;">Согг1</p> <p style="text-align: center;">«Частичное разрушение оборудования с жидким СПГ (включая трубопроводы)»</p>	<p>Разгерметизация технологического трубопровода или емкостного оборудования с жидким СПГ → выброс (истечение) СПГ → растекание СПГ на площадках ОГТ, в том числе на нескольких уровнях → интенсивное испарение СПГ → низкотемпературное воздействие на конструкции ОГТ → при наличии источника зажигания воспламенение выброса → сгорание ТВС в том числе в загроможденном пространстве → формирование струи пламени или пожара пролива → воздействие волн давления, а также прямое радиационное термическое воздействие (вплоть до разрушения или повреждения конструкций ОГТ) пожара на технологическое оборудование, конструкции ОГТ, а также на людей → несрабатывание или безуспешная отработка систем пожаротушения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>Криогенное воздействие.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Ударная волна.</p> <p>Токсичные продукты сгорания от вторичных пожаров.</p> <p>Обрушение конструкций ОГТ при низкотемпературном или высокотемпературном воздействии.</p>
<p style="text-align: center;">Согг2</p> <p style="text-align: center;">«Полное разрушение емкостного оборудования с жидким СПГ»</p>	<p>Разрушение емкостного оборудования с жидким СПГ → выброс СПГ → растекание СПГ на площадках ОГТ, в том числе на нескольких уровнях → интенсивное испарение СПГ → низкотемпературное воздействие на конструкции ОГТ → при наличии источника зажигания воспламенение выброса → сгорание ТВС в том числе в загроможденном пространстве → формирование пожара пролива → воздействие волн давления, а также прямое радиационное термическое воздействие (вплоть до разрушения или повреждения) пожара на технологическое оборудование, конструкции ОГТ, а также на людей → несрабатывание или безуспешная отработка систем пожаротушения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на</p>	<p>Криогенное воздействие.</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Ударная волна.</p> <p>Обрушение конструкций ОГТ при низкотемпературном или высокотемпературном воздействии.</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
	оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.	
<p style="text-align: center;">С_{огт3} «Утечка СПГ в помещении»</p>	<p>Разгерметизация технологического трубопровода или емкостного оборудования с СПГ → утечка СПГ внутри производственного помещения с образованием ТВС → при наличии источника зажигания воспламенение ТВС и ее дефлаграционное сгорание с образованием волны сжатия и пожара в загроможденном пространстве → образование зоны поражения ударной волной, горение пролива → прямое радиационное термическое воздействие пожара на технологическое оборудование, здания и сооружения, а также на людей → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование под давлением, емкости и аппараты, содержащие природный газ, сжиженные углеводороды и горючие жидкости, с распространением поражающих факторов за пределы объекта.</p>	<p>Криогенное воздействие.</p> <p>Снижение концентрации кислорода</p> <p>Прямое воздействие пламени.</p> <p>Тепловое излучение от пламени.</p> <p>Ударная волна.</p> <p>Токсичные продукты сгорания пожаров.</p> <p>Обрушение конструкций ОГТ при низкотемпературном или высокотемпературном воздействии.</p>
Сценарии на АГНКС, ГРС МГ, иных объектах малотоннажного производства		
<p style="text-align: center;">С_{мтп1} «Разрушение емкости с СПГ» (в том числе технологических, стационарных сателлитного хранения, транспортных)</p>	<p>В зависимости от конструкции емкости аналогично:</p> <p>либо С_{хран4} «Частичное разрушение хранилища под давлением»,</p> <p>либо С_{хран5} «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического двухоболочечного хранилища СПГ»,</p> <p>либо С_{хран6} «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического хранилища СПГ в кожухе».</p>	<p>В зависимости от конструкции емкости аналогично:</p> <p>либо С_{хран4} «Частичное разрушение хранилища под давлением»,</p> <p>либо С_{хран5} «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического двухоболочечного хранилища СПГ»,</p> <p>либо С_{хран6} «Разрушение внутренней оболочки полуизотермического хранилища СПГ в кожухе».</p>

Тип сценария	Описание сценария	Основные поражающие факторы
С _{тип2} «Разрушение трубопровода с СПГ»	Аналогично С _{труб2} «Разрыв трубопроводов с жидкой фазой под давлением»	Аналогично С _{труб2} «Разрыв трубопроводов с жидкой фазой под давлением»
С _{тип3} «Разрыв наливного шланга при сливе в передвижной заправщик или заправке транспортного средства»	Разрыв наливного шланга → пролив на поверхность → растекание СПГ с интенсивным кипением, испарением пролива; интенсивный переход жидкого СПГ в пар («физический взрыв») → распространение парогазового облака над окружающей территорией, постепенное перемешивание его с воздухом → образование взрыво- и пожароопасных концентраций природного газа → при появлении источника зажигания дефлаграционный взрыв облака, горение пролива, истекающего на месте пролива жидкого СПГ → повреждение транспортных средств и оборудования на площадке слива-налива, площадке топливозаправочного пункта → поражение людей воздушной волной сжатия, криогенной средой, термическим воздействием, асфиксия вследствие попадания в пары СПГ или продукты горения → возможное каскадное развитие аварии при воздействии поражающих факторов на оборудование и транспортные средства, содержащие СПГ (образование ОШ), с распространением поражающих факторов за пределы объекта.	Криогенное воздействие. Прямое воздействие пламени. Тепловое излучение от пламени. Ударная волна.

Группы сценариев на оборудовании, в котором обращается стабильный газовый конденсат, аналогичны описанным в Руководстве по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов», утверждённом приказом Ростехнадзора от 29 декабря 2022 г. № 478, и Руководстве по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на конденсатопроводах и продуктопроводах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 17 февраля 2023 г. № 69.

Приложение № 6
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 251

Примеры деревьев событий для ОПО СПГ

Анализ дерева событий используется для определения вероятности промежуточных событий (отдельных направлений развития аварии) и конечных событий (последствий аварии). Частота различных результатов оценивается посредством умножения исходной частоты выброса на вероятность в точке ветвления различных факторов, влияющих на конечный результат.

Примеры деревьев событий для ОПО СПГ приведены на рисунках ниже:

- разрушение емкости под давлением (Рисунок 6-1);
- разгерметизация технологического трубопровода с жидкой фазой (Рисунок 6-2) и с газовой фазой (Рисунок 6-3);
- разгерметизации изотермического резервуара (Рисунок 6-4);
- разгерметизация криогенного трубопровода СПГ (Рисунок 6-5).

На рисунке 6-1 приняты следующие условные вероятности событий: емкость сохраняет целостность после появления разрушения (a) – условная вероятность определяется согласно данным Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»;

разрушение ниже уровня жидкости (b) – пропорционально отношению средней высоты уровня жидкости (взлива) к высоте емкости (если нет данных, принимают 0,8);

образование капельной взвеси (диспергированной струи) (c) – 0,7 (только в случае свищей) – для стабильных жидкостей и 1 – для нестабильных;

образование BLEVE/ огненного шара (d) – условная вероятность определяется согласно данным Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» по полному и частичному разрушению емкости с учетом возможности образования BLEVE/ огненного шара для конкретного продукта в емкости;

Условная вероятность образования огненного шара d может быть уменьшена с учетом эффективности срабатывания установленных систем противоаварийной защиты, в том числе:

предотвращения возможностей теплового воздействия на резервуар со сжиженным газом со стороны внешнего аварийного источника;

исключения возможности скопления разлитого сжиженного газа непосредственно под резервуаром, в том числе за счет уклона поверхности для отвода аварийных утечек сжиженного газа из резервуара или трубопроводов обвязки с помощью дренажных систем на безопасное расстояние;

наличия активной и пассивной тепловой защиты, в том числе теплоизоляции (перлитно-вакуумной, экранно-вакуумной, керамической), вспучивающихся покрытий, огнестойких укрытий, огнезащитных экранов для технологического оборудования.

мгновенное воспламенение и образование горящих проливов/факелов (e, f, g) – согласно таблице 6-1, приведенной ниже;

возможность образование дрейфующего облака ТВС при испарении из пролива (h, i, j) – для всех жидкостей с давлением насыщенных паров менее 10 кПа – 0, в остальных случаях – 1;

появление на пути дрейфующего облака источника зажигания (m, n, o, p, q) – согласно таблице 6-1, приведенной ниже.

Условные вероятности воспламенения (в том числе на представленных деревьях событий, рисунки 6-1 – 6-5) принимаются согласно нижеприведенной таблице⁹:

Условные вероятности воспламенения выбросов ОВ

Таблица № 6-1

	Малый выброс: длительный до 1 кг/с или залповый ¹⁰ до 1 т.		Средний выброс: длительный 1 – 50 кг/с или залповый ⁷ 1-10 т.		Большой выброс: длительный >50 кг/с или залповый ⁷ более 10 т.	
	мгновенное	отложенное	мгновенное	отложенное	мгновенное	отложенное
Газ, вскипающие жидкости ¹¹ (береговые установки)	0,001	0,001	0,0125	0,0125	0,125	0,125
Газ, вскипающие жидкости (морские установки)	0,00055	0,00055	0,01065	0,01065	0,075	0,075
Стабильные жидкости (береговые установки)	0,001	0,001	0,00865	0,00865	0,06	0,06
Стабильные жидкости (морские установки)	0,0105	0,0105	0,0035	0,0035	0,00875	0,00875

⁹ Данные согласно:

IP Research Report. Ignition probability review, model development and look-up correlations. Energy Institute, London, January 2006.

International association of Oil & Gas Producers. Risk Assessment Data Directory. Ignition Probabilities. Report 434-06, September 2019.

¹⁰ Выброс менее 120 сек считается залповым и истечение по расходу не рассматривается.

¹¹ Под вскипающими жидкостями подразумеваются среды, обращающиеся при температуре выше температуры кипения (полузотермические хранилища).

Вероятность воспламенения облаков, образующихся при проливе жидкостей из изотермических хранилищ, принимается равной вероятности воспламенения газовых выбросов (таблица № 6-1) в зависимости от интенсивности кипения в проливе.

На рисунке 6-2 (трубопровод со стабильной жидкостью) приняты следующие условные вероятности событий:

возможность разрыва с образованием смеси (1-a) – 0,7;

мгновенное воспламенение и образование горящих проливов (факелов) (b, c) – согласно таблице 6-1, приведенной выше;

образование ТВС (включая процесс испарения из полива) (e, d) для всех жидкостей с давлением насыщенных паров менее 3 кПа (в помещении) и 10 кПа (на открытой площадке) – d=0, в остальных случаях – d=1; e=1;

появление на пути дрейфующего облака источника зажигания (f, g, h, i) – согласно таблице № 6-1, приведенной выше.

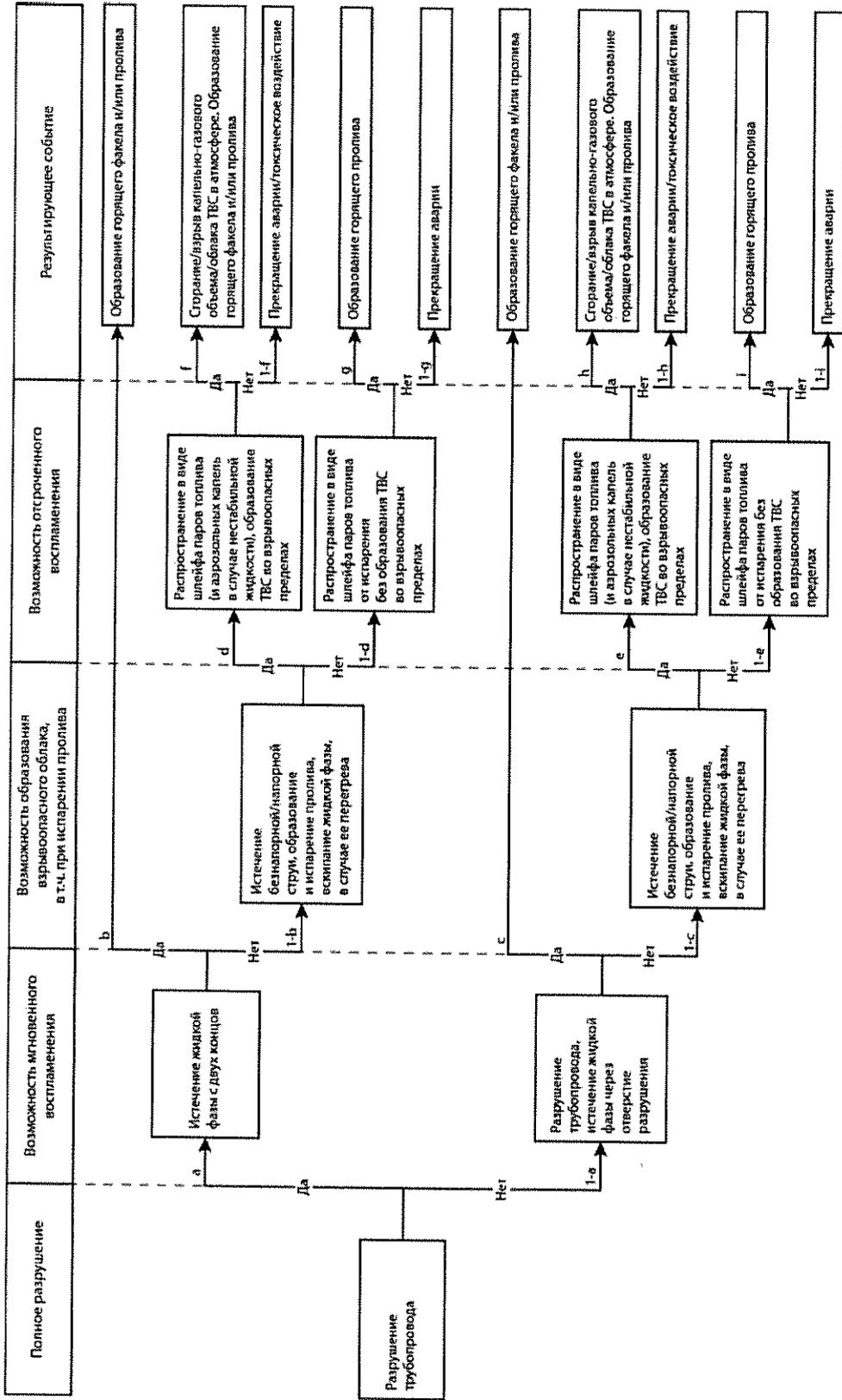


Рисунок 6-2. Пример дерева событий при разгерметизации технологического трубопровода с жидкой фазой под давлением

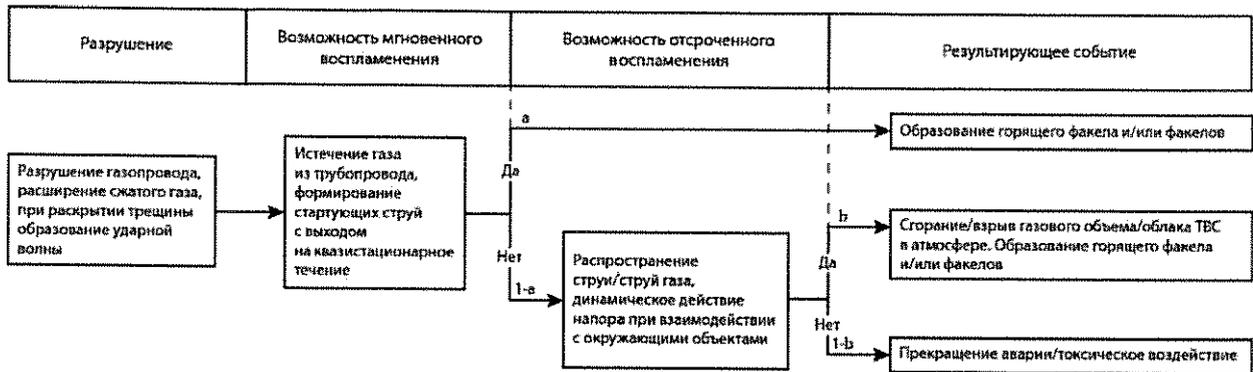


Рисунок 6-3. Пример дерева событий при разгерметизации технологического трубопровода с газовой фазой под давлением



Рисунок 6-4. Пример дерева событий при разгерметизации изотермического резервуара с двумя барьерами безопасности

На рисунке 6-5 приняты следующие условные вероятности событий: вероятность сохранения целостности наружного трубопровода $a=0,9$; вероятность сброса пара из межстеночного пространства $b=0,9$; вероятность наличия напора на месте выброса $c = 1$, при сохранении избыточного давления на месте разрушения более 3 атм и $c = 0$ в остальных случаях.

Приведенные условные вероятности могут быть скорректированы с учетом дополнительных решений, направленных на снижение риска аварий на ОПО СПГ.

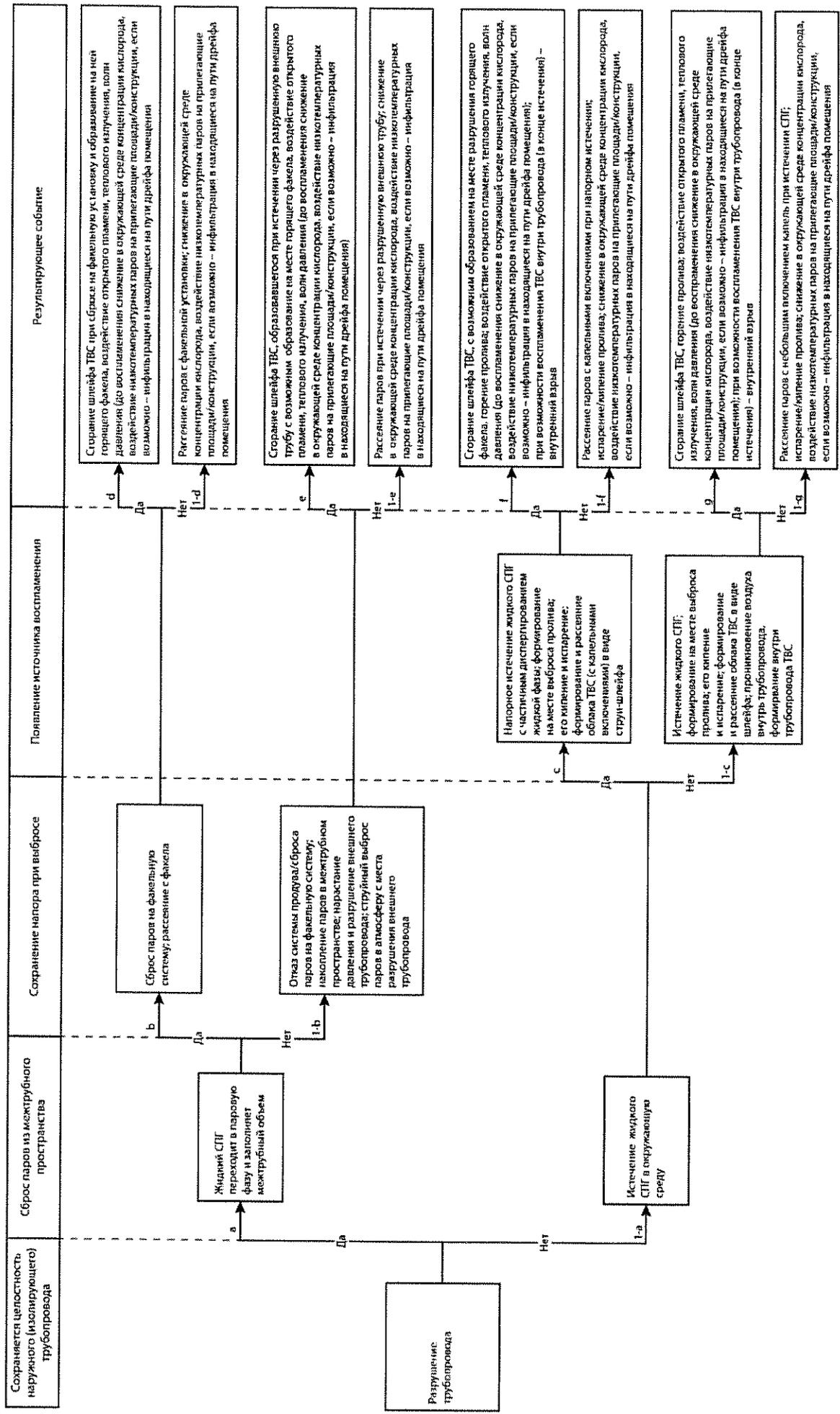


Рисунок 6-5. Пример дерева событий для криогенного трубопровода с СПГ

Приложение № 7
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 251

**Рекомендуемые математические модели для численного расчета
процессов истечения, распространения, воспламенения и взрыва
топливно-воздушных смесей с участием СПГ**

Численное моделирование (вычислительная гидродинамика) – подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для расчета параметров и последствий аварийного выброса опасных веществ.

**7.1. Упрощенные модели для расчета скорости выброса СПГ
из отверстия разгерметизации**

Расчет скорости поступления СПГ и других криогенных жидких сред при частичной разгерметизации технологического оборудования, в том числе технологических трубопроводов, производится с учетом рекомендаций раздела IV Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утверждённого приказом Ростехнадзора от 2 ноября 2022 г. № 385 (далее – Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ»).

Расчет скорости поступления природного газа при разрушении оборудования, в том числе технологических трубопроводов, рекомендуется выполнять в соответствии с разделом IV Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» или приложением № 6 Руководства по безопасности «Методика

оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных газов», утверждённого приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 410.

7.2. Численный расчет аварийного истечения СПГ из трубопроводных систем (аварийное истечение, расчеты в неизотермическом приближении)

Расчет скорости поступления СПГ и других криогенных жидких сред при частичной разгерметизации линейной части трубопроводных систем производится с учетом рекомендаций приложения № 2 Руководства по безопасности «Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазодобычи», утверждённого приказом Ростехнадзора от 10 января 2023 г. № 4.

7.3. Подход для расчета растекания, испарения и кипения жидкостей на суше с ровным рельефом и стоячей воде

7.3.1. Общие положения

При разгерметизации оборудования рассматривается поступление жидкости в окружающую среду, его мгновенное вскипание и переход в пролив:

$$\begin{cases} q_{\text{ж}}(t) = q_{\text{выб}}(t) - q'(t) - q''(t) \\ q'(t) = q_{\text{выб}}(t) \left(1 - \exp\left(-\frac{c_p(T_{\text{выбр}}) \cdot (T_{\text{выбр}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{выбр}} - T_{\text{кип}}|)}{2 \cdot \Delta H_{\text{кип}}}\right) \right) \\ q''(t) = \min(q'(t), q_{\text{выб}}(t) - q'(t)) \end{cases} \quad (7-1)$$

где: $q_{\text{выб}}(t)$ – массовая скорость выброса жидкого опасного вещества, кг/с;

$q_{\text{ж}}(t)$ – массовая скорость поступления жидкого опасного вещества в пролив, кг/с;

$q'(t)$ – массовая скорость поступления в атмосферу газообразного опасного вещества, образующегося при мгновенном вскипании жидкой фазы в случае истечения жидкого опасного вещества из разрушенного оборудования, кг/с;

$C_p(T)$ – теплоемкость жидкой фазы при температуре T , Дж/кг/К;

$T_{\text{выбр}}$ – температура вещества в оборудовании, К;

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкого опасного вещества, К;

$\Delta H_{\text{кип}}$ – теплота испарения (кипения) жидкого опасного вещества, Дж/кг;

$q''(t)$ – массовая скорость поступления в атмосферу капель (аэрозоля) опасного вещества, образующихся при мгновенном вскипании жидкой фазы в случае истечения жидкого опасного вещества из разрушенного оборудования, кг/с.

Масса жидкости, находящаяся в проливе в каждый текущий момент времени t $Q'_{\text{пр}}(t)$, определяется балансом поступления в пролив жидкости из разрушенного оборудования и переходом в газовую фазу при кипении и испарении пролива:

$$\frac{dQ'_{\text{пр}}}{dt} = q_{\text{ж}}(t) - q_{\text{исп}}(t) \quad (7-2)$$

где: $q_{\text{исп}}(t)$ – массовая скорость испарения или кипения жидкого опасного вещества в проливе, кг/с.

Уравнение баланса масс (7-2) является основным для описания нестационарного процесса кипения, испарения жидкости. Это уравнение дополняется соотношением (7-1), учитывающим характер (мгновенный или длительный) и интенсивность поступления жидкости в пролив, а также соотношениями, определяющими растекание, кипение и испарение с учетом всех многообразных факторов теплообмена и массопереноса, в том числе специфику разлития на твердую подстилающую поверхность и воду.

Исходными данными для выполнения расчетов и моделирования являются:

- массовая скорость выброса жидкого опасного вещества ($q_{\text{выб}}(t)$);
- характеристика выбрасываемого вещества;
- тип и характеристики поверхности разлива,

- метеорологические условия. В качестве скорости ветра, температуры воздуха и подстилающей поверхности при моделировании аварийных ситуаций принимается скорость ветра и температура воздуха согласно метеорологическим данным за исследуемый период времени в области возможной аварии. Допускается для сокращения числа рассматриваемых метеоусловий принимать температуру воздуха и подстилающей поверхности равной максимальной среднемесячной температуре окружающего воздуха в наиболее теплый месяц года за 10-летний период метеонаблюдений.

7.3.2. Растекание, кипение и испарение на рельефной неоднородной поверхности

В случае если растекание аварийного выброса происходит по поверхностям, имеющим значительный перепад высот и (или) переменные теплофизические характеристики (в том числе за счет температурной зависимости, неоднородности материала, присутствия влаги) и, в частности, теплопроводность, рекомендуется решать задачу о растекании, испарении и кипении с использованием подходов вычислительной гидродинамики (CFD). Следует отметить, что при этом следует рассматривать и сопряженную задачу о теплопроводности в средах, с которыми контактирует пролив. Моделирование растекания по рельефу рекомендуется выполнять с использованием уравнений Сен-Венана (уравнений «мелкой воды») в двухмерной (осреднение скорости течения по высоте) постановке с описанием трехмерного профиля свободной поверхности. Рельеф местности задается с помощью двухмерной эйлеровой сетки, в каждой ячейке которой определяется высота рельефа. Залповые выбросы жидких сред моделируются путем задания уровня жидкости в расчетной области в виде начальных условий. Длительные выбросы моделируются путем включения источникового члена (граничного условия) в уравнения Сен-Венана. Параметры источникового члена определяются в ячейках расчетной области, в которых происходит выброс, путем задания зависимости объемного расхода жидкости, переходящей в пролив, от времени. Для каждой ячейки расчетной

области задаются параметры поглощения жидкости подстилающей поверхностью, а также характеристики ее теплопроводящих свойств. Рекомендуется учитывать, что изменение уровня жидкости в ячейках расчетной области на твердой поверхности происходит под действием следующих факторов: гравитационно-вязкостное растекание жидкости, действие инерционных сил, кипение, испарение, проникание в подстилающую поверхность. Для разливов жидких сред по водным объектам учитываются следующие факторы: гравитационно-вязкостное растекание, действие инерционных сил, кипение, испарение, эмульгирование, растворение в воде, распространение на глубину, дрейф разлива за счет водных течений и ветра. Каждый из составляющих факторов представляется в виде источникового члена в уравнении «мелкой воды» и соответствующих потоков через границы ячеек расчетной области.

При моделировании разливов СПГ рекомендуется учитывать различные режимы кипения (пленочный и пузырьковый), а также испарение жидкости.

Учет теплообмена между проливом жидкости и твердыми поверхностями, с которыми она контактирует, проводится путем решения в каждой ячейке расчетной области одномерного уравнения теплопроводности на основе закона теплопроводности Фурье, либо известных решений этого уравнения для СПГ и типов подстилающей поверхности с учетом их толщины. При этом сопряжение решений в проливе и подстилающей поверхности достигается по равенству либо температур (пузырьковый режим кипения), либо теплового потока (пленочный режим кипения).

7.3.3. Кипение и испарение на ровной однородной поверхности

Начальная температура пролива $T_{пр}$ полагается равной температуре проливающейся жидкости, для вскипающих жидкостей и жидкостей изотермического хранения – температуре кипения $T_{пр} = T_{кип}$.

Для моделирования испарения и кипения разливов рассматриваются основные тепловые потоки к проливу или от пролива:

- наличие исходного запаса тепла в проливе за счет поступления в пролив жидкой фазы (в том числе новых порций);
- теплообмен с подстилающей землей или водой;
- теплообмен с воздухом;
- теплоприток за счет солнечного излучения;
- теплопотери на испарение.

Мощность суммарного теплового потока $W_{\text{общ}}(t)$ к проливу, от пролива определяется уравнением:

$$W_{\text{общ}}(t) = W_{\text{пов}}(t) + W_{\text{конв}}(t) + W_{\text{изл}}(t) + W_{\text{пр}}(t) - W_{\text{исп}}(t) \quad (7-3)$$

где: $W_{\text{пов}}(t)$ – мощность теплового потока от подстилающей поверхности, Вт;

$W_{\text{конв}}(t)$ – мощность теплового потока от воздуха, Вт;

$W_{\text{изл}}(t)$ – мощность теплового потока от солнечного излучения, Вт;

$W_{\text{пр}}(t)$ – мощность теплового потока, поступающего в пролив жидкости в единицу времени, Вт;

$W_{\text{исп}}(t)$ – потери внутренней энергии в единицу времени на испарение жидкости за счет испарения в поле ветра, Вт.

Изменение температуры пролива описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT_{\text{пр}}(t)}{dt} = \frac{W_{\text{общ}}(t)}{Q'_{\text{пр}}(t) \cdot c_p(T_{\text{пр}}(t))} \quad (7-4)$$

где: $c_p(T)$ – теплоемкость жидкости при температуре T , Дж/кг/К.

При проливе на неограниченную поверхность жидкости допускается считать $T_{\text{пр}}(t)$ равной $T_{\text{кип}}$ на протяжении всего процесса испарения.

При начальной температуре СПГ в проливе $T_{\text{кип}} = -162^\circ\text{C}$ пролив жидкости всегда будет начинать кипеть сразу после соприкосновения с подстилающей поверхностью. Поступающие к проливу тепловые потоки ($W_{\text{пов}}(t)$, $W_{\text{конв}}(t)$, $W_{\text{изл}}(t)$, $W_{\text{пр}}(t)$) вызывают переход жидкости в паровую фазу. Наиболее интенсивным в начале является поток $W_{\text{пов}}(t)$, этот поток вызывает собственно кипение – образование пузырьков пара внутри объема жидкости. Этот поток приводит к забору тепла от подстилающей поверхности

и ее охлаждению, соответственно температура поверхности снижается, стремясь к температуре пролива. Соответственно со временем $W_{\text{пов}}(t)$ стремится к нулю, что приводит к прекращению кипения и переходу к испарению (без образования пузырьков внутри жидкой фазы). Теплообмен и массообмен в дальнейшем обусловлен теплообменом с воздухом, нагревом от солнца, поступлением жидкости в пролив и движением воздуха. Таким образом, можно выделить два этапа перехода паров жидкости из пролива в атмосферу: кипение и испарение. Описать этот фазовый переход с небольшим консерватизмом можно соотношением для массовой скорости испарения:

$$q_{\text{исп}}(t) = \frac{W_{\text{тп}}(t) + W_{\text{конв}}(t) + W_{\text{изл}}(t) + W_{\text{пр}}(t) + W_{\text{исп}}(t)}{\Delta H_{\text{исп}}(T_{\text{пуз}})} \quad (7-5)$$

Каждый из потоков $W_{\text{пов}}(t)$, $W_{\text{конв}}(t)$, $W_{\text{изл}}(t)$, $W_{\text{пр}}(t)$, $W_{\text{исп}}(t)$ рассчитывается по нижеприведённым формулам.

Расчет мощности теплового потока $W_{\text{исп}}(t)$ для испарения за счет движения воздуха при проливе на суше проводится по формуле:

$$W_{\text{исп}}(t) = 0,004786 \cdot u_{10}^{0,78} \cdot \pi \cdot r(t)^{1,89} \cdot Sc^{-0,67} \cdot \Delta H_{\text{исп}}(T_{\text{пр}}) \frac{M_c \cdot P_{\text{нас}}(T_{\text{пр}})}{R \cdot T_{\text{пр}}} \quad (7-6)$$

где: u_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с;

Sc – число Шмидта $Sc = \nu_{\text{возд}}/D$;

$\nu_{\text{возд}}$ – кинематическая вязкость воздуха, м/м/сек;

$D_{\text{вг}}$ – коэффициент диффузии воздуха и природного газа, м²/сек;

M_c – молярная масса метана, кг/моль.

Расчет мощности теплового потока $W_{\text{исп}}(t)$ для испарения за счет движения воздуха при проливе на воду (с учетом волн на поверхности воды и связанной с этим неровностью поверхностью разлива) проводится по формуле:

$$W_{\text{исп}}(t) = \pi \cdot r(t)^2 \cdot U_{\text{атм}}^* \cdot Da^* \cdot \Delta H_{\text{исп}}(T_{\text{пр}}) \frac{M_c \cdot P_0}{R \cdot T_{\text{пр}}} \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p_0 - P_{\text{нас}}(T_{\text{пр}})}\right) \quad (7-7)$$

$$\text{где: } U_{\text{атм}}^* = u_{10} \sqrt{\frac{c_f}{2}} \quad (7-8)$$

$$\frac{c_f}{2} = \begin{cases} 1,98 \cdot 10^{-3}, & \text{если } u_{10} < 0,1 \text{ м/с} \\ 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot (u_{10})^{-0,2}, & 0,1 \leq u_{10} < 3,06 \text{ м/с} \\ (0,8 + 0,065 \cdot u_{10}) \cdot 10^{-3}, & 3,06 \leq u_{10} < 22,3 \text{ м/с} \\ 2,25 \cdot 10^{-3}, & 22,3 \text{ м/с} \leq u_{10} \end{cases} \quad (7-9)$$

$$Da^* = \frac{1}{\frac{Sc_t \cdot \ln(\delta_+)}{k} + \beta + 2,35} \quad (7-10)$$

k – константа Кармана, равная 0,41;

Sc_t – турбулентное число Шмидта, равное 0,85;

$$\delta_+ = \frac{10 \cdot U_{атм}^* \cdot \rho_{возд}}{\mu_{возд}(T_{возд})} \quad (7-11)$$

$$\beta = \begin{cases} 12,5 \cdot Sc^{\frac{2}{3}} + \frac{Sc_t \cdot \ln(Sc)}{k} - 5,3, & u_{10} < 5 \text{ м/с} \\ 0,55 \cdot h_w^{\frac{1}{2}}(Sc - 0,2) - \frac{Sc_t \cdot \ln(h_w)}{k} + 11,2 \cdot Sc_t, & u_{10} \geq 5 \text{ м/с} \end{cases} \quad (7-12)$$

$$h_w = 0,01384 \cdot \frac{u_{10} \cdot U_{атм}^* \cdot \rho_{возд}}{\mu_{возд}(T_{возд})} \quad (7-13)$$

Расчет тепловой энергии, поступающей в пролив (с температурой $T_{пр}$) с жидкой фазой истекающей жидкости (с температурой T) в единицу времени $W_{пр}(t)$, проводится по формуле:

$$W_{пр}(t) = q_{ж}(t) \cdot C_p(T) \cdot (T - T_{пр}) \quad (7-14)$$

Расчет мощности теплового потока от подстилающей поверхности $W_{пов}(t)$ при проливе на твердую поверхность проводится по формуле:

$$W_{пов}(t) = 2\pi\theta \int_0^{r(t)} \frac{r' dr'}{\sqrt{t-t'}} \text{, при } T_{п} - T_{пр}(t) < 30$$

$$W_{пов}(t) = h_s \pi r^2(t) (T_{п} - T_{пр}(t)) \text{, при } T_{п} - T_{пр}(t) \geq 30 \quad (7-15)$$

где: r – радиус пролива в момент времени t , м;

$$\theta = \frac{\chi_{п} \cdot \lambda_{п} \cdot (T_{п} - T_{пр}(0))}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{п}}} \quad (7-16)$$

$\chi_{п}$ – безразмерный коэффициент шероховатости;

h_s – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²/К;

$\lambda_{п}$ – коэффициент теплопроводности подстилающей поверхности пролива, Вт/м/К;

$T_{п}$ – температура подстилающей поверхности пролива, К;

$\alpha_{п}$ – коэффициент тепловой диффузии поверхности, м²/сек.

Параметры подстилающей поверхности

Таблица № 7-1

№ п/п	Поверхность	Безразмерный коэффициент шероховатости χ_n	Коэффициент теплопроводности и λ_n , Вт/м/К	Коэффициент тепловой диффузии α_n , м ² /сек
1	Влажный грунт	2,63	2,21	$9,48 \cdot 10^{-7}$
2	Сухой грунт	2,63	0,32	$2,44 \cdot 10^{-7}$
3	Бетон	1,00	1,21	$5,72 \cdot 10^{-7}$
4	Теплоизоляционный бетон	1,00	0,22	$8,27 \cdot 10^{-7}$

Расчет мощности теплового потока от подстилающей поверхности $W_{\text{пов}}(t)$ при проливе на водную поверхность проводится следующим образом.

Кипение и испарение криогенных жидкостей на воде может привести к образованию слоя льда на поверхности воды. Как правило, разливы таких жидкостей на большой площади воды не образуют слоя льда, так как происходит устойчивая конвекция тепла от воды в пролив. Однако разливы жидкостей с температурой кипения ниже температуры воды в небольшие объемы воды могут привести к образованию слоя льда.

Расчет мощности теплового потока от воды к проливу без образования льда:

$$W_{\text{тп}} = h_s \cdot \pi \cdot r(t)^2 \cdot (T_n(0) - T_{\text{пр}}) \quad (7-17)$$

где: h_s – коэффициент теплопередачи в Вт/К/м².

Расчет мощности теплового потока от воды к проливу без образования льда:

При расчете мощности теплового потока от воды к проливу при образовании льда (обычно в водоемах со стоячей водой, глубиной до нескольких метров) предполагается, что толщина слоя льда со временем увеличивается по мере того, как криогенная жидкость охлаждает воду на увеличивающихся глубинах. Мощность, с которой тепло поступает в пролив, равна:

$$W_{\text{тп}}(t) = \frac{\pi \cdot r(t)^2 \cdot \varepsilon}{\sqrt{t}} \quad (7-18)$$

$$\text{где: } \varepsilon = \frac{k_{\text{л}} \cdot (273,15 - T_{\text{пр}})}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{\text{л}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\kappa \cdot \beta_{\text{л}}}{2\sqrt{\alpha_{\text{л}}}}\right)}} \quad (7-19)$$

$k_{\text{л}}$ – коэффициент теплопроводности льда при температуре $T_{\text{кип}}$, Вт/м/К;

$\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент тепловой диффузии льда при температуре $T_{\text{кип}}$, м²/с;

$\beta_{\text{л}}$ – коэффициент объемного расширения льда (1,0907);

Коэффициент κ вычисляется из уравнения:

$$\frac{(273,15 - T_{\text{кип}}) \cdot k_{\text{л}} \cdot \exp\left(-\frac{\beta_{\text{л}}^2 \cdot \kappa^2}{4 \cdot \alpha_{\text{л}}}\right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{\text{л}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\beta_{\text{л}} \cdot \kappa}{2\sqrt{\alpha_{\text{л}}}}\right)}} - \frac{(T_{\text{п}} - 273,15) \cdot k_{\text{воды}} \cdot \exp\left(-\frac{\kappa^2}{4 \cdot \alpha_{\text{воды}}}\right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{\text{воды}} \cdot (1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\kappa}{2\sqrt{\alpha_{\text{воды}}}}\right))}} = \frac{1}{2} \cdot F_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{л}}^{\beta_{\text{л}} \cdot \kappa} \quad (7-20)$$

где: $T_{\text{п}}$ – температура поверхности воды, К;

$k_{\text{воды}}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/м/К;

$\alpha_{\text{воды}}$ – коэффициент тепловой диффузии воды, м²/с;

$F_{\text{воды}}$ – удельная теплота плавления льда, $3,336 \cdot 10^5$ Дж/кг;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, кг/м³;

t – время от начала пролива, сек;

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения смеси, К.

Расчет мощности теплового потока от воздуха при проливе на землю и воду проводится по формуле:

$$W_{\text{конв}}(t) = \lambda_{\text{возд}} \cdot Nu(t) \cdot \frac{\pi \cdot r(t)}{2} (T_{\text{возд}} - T_{\text{пр}}(t)) \quad (7-21)$$

где: $\lambda_{\text{возд}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м/К;

$T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, К;

$Nu(t)$ – число Нуссельта.

$$Nu(t) = \begin{cases} 0,664 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re(t)^{1/2} & \text{если } Re(t) < 320 \\ 0,037 \cdot Pr^{1/3} \cdot (Re(t)^{0,8} - 15200) & \text{если } Re(t) \geq 320 \end{cases} \quad (7-22)$$

где: Pr – число Прандтля;

$$Pr = C_{p \text{ возд}} \cdot \mu_{\text{возд}} / \lambda_{\text{возд}} \quad (7-23)$$

$$Re(t) = u_{10} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot 2 \cdot r(t) / \mu_{\text{возд}} \quad (7-24)$$

где: $C_{p \text{ возд}}$ – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/кг/К;

$\mu_{\text{возд}}$ – динамическая вязкость воздуха, кг/м/сек.

В дневное время пролив может нагреваться от солнечного излучения. В общий тепловой баланс пролива вносят и излучения от воздуха и пролива.

Расчет мощности теплового потока при переносе энергии излучением $W_{\text{изл}}(t)$ проводится по формуле:

$$W_{\text{изл}}(t) = W_{\text{солн}}(t) + W_{\text{т.и.}}(t) \quad (7-25)$$

$$W_{\text{солн}}(t) = \pi \cdot r(t)^2 \cdot w_{\text{солн}} \quad (7-26)$$

$$W_{\text{т.и.}}(t) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{возд}}^4 - T_{\text{пр}}^4) \cdot \pi \cdot r(t)^2 \quad (7-27)$$

где: $w_{\text{солн}}$ – поток тепла от солнца, Вт/м²;

ε – излучательная способность пролива (0,95);

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²/К⁴.

7.3.4. Растекание жидких опасных веществ по ровной поверхности

Процесс растекания происходит:

либо до достижения расчетной толщины пролива $h(t)$ значения h_{min} в допущении о том, что пролив имеет форму круга:

$$h(t) = \frac{Q_{\text{пр}}(t)}{\rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot r^2(t)} \quad (7-28)$$

где: $r(t)$ – радиус пролива, м;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность смеси ОВ, кг/м³;

t – время от начала выброса, сек;

либо (при длительном поступлении жидкости в пролив) до достижения проливом размеров, при которых скорость испарения из пролива $q_{\text{исп}}(t)$ становится равной скорости поступления жидкости в пролив $q_{\text{ж}}(t)$.

При проливе опасного вещества на твердую поверхность радиус пролива r рассчитывается по соотношению:

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{2g(h(t) - h_{\text{min}})} \quad (7-29)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с²;

$h(t)$ – толщина пролива в момент времени t , м;

h_{min} – минимальная толщина пролива, м.

При свободном разливе на бетонное или асфальтное покрытие

минимальную толщину слоя разлитой жидкости допускается принимать 0,01 м. Для приближенной оценки площади загрязнения жидкости водной поверхности можно принимать толщину слоя 0,001 м. При отсутствии данных допускается учитывать толщины слоя разлитой жидкости по соответствующим данным для нефтепродуктов (раздел 3 приложения № 9 Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов»).

При проливе жидкости на воду радиус пролива r определяется с учетом меняющихся условий распространения пролива. Рассматриваются три стадии растекания. На начальной стадии растекание определяется силами инерции и гравитации, на второй – силой гравитации и вязкостью пролитой жидкости, на третьей – вязкостью и силами поверхностного натяжения.

Расчет радиуса разлива при мгновенном выбросе жидкости выполняется по соотношениям:

для первой стадии разлива $0 < t < t_1$:

$$r(t) = K_{10} \left(\frac{g \cdot (\rho_B - \rho_J)}{\rho_B} \cdot Q_{\text{пр}} \right)^{1/4} \cdot t^{1/2} \quad (7-30)$$

$$t_1 = \left(\frac{K_{20}}{K_{10}} \right)^4 \left(\frac{\rho_B \cdot Q_{\text{пр}} \cdot \rho_B}{\rho_J \cdot g \cdot \mu_B \cdot (\rho_B - \rho_J)} \right)^{1/3} \quad (7-31)$$

для второй стадии разлива $t_1 \leq t < t_2$:

$$r(t) = K_{20} \left(\frac{g \cdot (\rho_B - \rho_J)}{\rho_J^2 \cdot (\mu_B \cdot \rho_B)^{1/2}} \right)^{1/6} \cdot (Q_{\text{пр}})^{1/3} \cdot t^{1/4} \quad (7-32)$$

$$t_2 = (K_{20})^2 \left(\frac{Q_{\text{пр}}^2 \cdot g \cdot \mu_B \cdot (\rho_B - \rho_J)}{(\rho_B \cdot \rho_J)^2} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_B}{2\sigma} \right) \quad (7-33)$$

для третьей стадии разлива $t \geq t_2$:

$$r(t) = \left(\frac{4 \cdot \sigma^2}{\mu_B \cdot \rho_B} \right)^{1/4} \cdot t^{3/4} \quad (7-34)$$

Для длительного выброса опасного вещества третья стадия происходит одновременно со второй. Расчет радиуса разлива при длительном выбросе жидкости выполняется по соотношениям:

для первой и второй стадии разлива $0 < t < t_3$:

$$r(t) = K_{10} \left(\frac{g \cdot (\rho_B - \rho_{ж})}{\rho_B} \cdot Q_{пр}(t) \right)^{1/4} \cdot t^{1/2} \quad (7-35)$$

$$t_3 = \left(\frac{K_{21}}{K_{11}} \right)^4 \left(\frac{\rho_B \cdot Q_{пр}(t) \cdot \rho_B}{\rho_{ж} \cdot g \cdot \mu_B \cdot (\rho_B - \rho_{ж})} \right)^{1/3} \quad (7-36)$$

для третьей стадии разлива $t \geq t_3$:

$$r(t) = K_{21} \left(\frac{g \cdot (\rho_B - \rho_{ж})}{\rho_{ж}^2 \cdot (\mu_B \cdot \rho_B)^{1/2}} \right)^{1/6} \cdot (Q_{пр}(t))^{1/3} \cdot t^{1/4} \quad (7-37)$$

где: $K_{10}=1,53$; $K_{20}=1,21$; $K_{11}=1,24$; $K_{21}=1,09$;

ρ_B – плотность воды 1000 кг/м^3 ;

$Q_{пр}$ – масса жидкой фазы, формирующей пролив при залповом выбросе ОВ, кг;

t – время, сек.;

μ_B – динамическая вязкость воды, кг/м/сек. ;

σ – поверхностное натяжение воды, Н/м.

Так же, как и для продолжительного выброса на суше, размер пролива на воду ограничивается размерами, при которых скорость испарения из пролива $q_{исп}(t)$ становится равной скорости поступления жидкости в пролив $q_{ж}(t)$.

Согласно изложенному определяются временные зависимости основных характеристик пролива, необходимые для расчета последующих негативных воздействий:

- $Q'_{пр}(t)$ – масса жидкости в проливе в заданный момент времени (уравнение (7-2));

- $W_{общ}(t)$ – мощность суммарного к проливу, от пролива в заданный момент времени (уравнение (7-3));

- $T_{пр}(t)$ – температура пролива в заданный момент времени (уравнение (7-4));

- $q_{исп}(t)$ – скорость испарения пролива в заданный момент времени (уравнение (7-5));

- $r(t)$ – радиус пролива на текущий момент времени (уравнение (7-29), или (7-30), (7-32), (7-34), или (7-35), (7-37)).

7.4. Оценка последствий процессов горения и взрыва на ОПО с СПГ

При авариях на ОПО с СПГ с точки зрения степени перемешанности топлива и окислителя (воздуха) возможно энерговыделение в двух режимах:

- диффузионное горение;
- горение и детонация заранее перемешанной смеси.

В диффузионном режиме топливо и окислитель разделены и контактируют только на поверхности энерговыделения. В таком режиме осуществляется горение:

- факелов;
- проливов;
- переобогащенных (с концентрацией выше ВКПР) облаков в атмосфере;
- огненных шаров в режиме BLEVE;
- горение газа на поверхности воды при выходе из подводного трубопровода.

В случае заранее перемешанной смеси в каждой точке пространства одновременно находится и окислитель (воздух), и топливо (газ, капельная взвесь). Такой режим реализуется в облаках, дрейфующих в атмосфере и постепенно смешивающихся с воздухом, а также внутри оборудования, куда при аварийном истечении может проникать воздух. В таких областях могут реализовываться разноскоростные режимы горения и детонации.

Для расчета параметров горящих факелов, огненных шаров и горящих проливов рекомендуется использовать подходы, изложенные в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах и Руководстве по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа», утверждённом приказом Ростехнадзора от 22 декабря 2022 г. № 454.

При расчете горящих проливов легкоиспаряющихся веществ (метан, этан, СУГ) следует учитывать зависимость от времени размеров пролива.

С учетом этого изменения рассчитывается как геометрия очага горения, так и поражающее действие от пожара. При этом рекомендуется шаг учета изменения радиуса разлива принимать не менее 20%.

Поскольку при авариях на ОПО с СПГ в силу низкой температуры и больших объемов опасных веществ возможен быстрый переход жидкой фазы в паровую с образованием протяженных топливно-воздушных облаков, могут возникать облака с большими зонами переобогащенных смесей (с концентрацией выше ВКПР). Эти объемы при наличии источника зажигания могут выгорать в диффузионном режиме с образованием огненного шара. При этом интенсивность теплового излучения и интенсивность волн давления невелика, поэтому для оценки зон поражения в этом случае рекомендуется использовать границу зоны с концентрацией $0,5 \cdot \text{НКПР}$, зоны существования открытого пламени. Для этих расчетов рекомендуется использовать подход, изложенный в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 412.

Для расчета параметров горящего метана при выходе его на водную поверхность из разрушенного подводного газопровода или танка (резервуара) ПРГУ рекомендуется использовать подход, изложенный в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах и Руководстве по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа», утверждённом приказом Ростехнадзора от 22 декабря 2022 г. № 454.

При расчете таких горящих очагов их радиус полагается равным радиусу пузырьковой струи при ее выходе на водную поверхность. Расход топлива в очаге горения полагается равным расходу на месте разрушения газопровода.

Наличие протяженных и длительно существующих облаков ТВС создает условия для инфильтрации взрывоопасных паров внутрь имеющихся на пути дрейфа облаков строений, зданий, сооружений. Наличие таких

замкнутых объемов может при наличии источника зажигания в них создавать опасность внутренних взрывов.

При расчете последствий таких взрывов рекомендуется рассматривать эквивалентную ситуацию детонационного взрыва массы ТВС, содержащуюся внутри замкнутого объема. Для такого расчета рекомендуется использовать подход, изложенный в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 412.

Этот же подход используется для расчета последствий взрывного горения облаков ТВС на открытом пространстве. При этом следует отдельно рассматривать ситуации, когда энерговыделение инициируется внутренним взрывом в помещении. В этом случае класс чувствительности вещества, участвующего в горении, взрыве повышается на единицу.

Для получения детальной информации о действии волн давления рекомендуется подход, изложенный в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415.

7.5. Распространение выбросов в атмосфере.

Для расчета распространения выброса в атмосфере рекомендуется использовать либо детальное численное моделирование, либо интегральный подход.

Для струйного выброса в атмосферу, в том числе при сбросе паров СПГ из межтрубного или межстеночного пространства при использовании интегрального подхода, рекомендуется также учитывать струйный участок течения.

Учитывая тот факт, что криогенные проливы отличаются существенной динамикой, переменным размером пролива на протяжении процесса испарения, рекомендуется учитывать переменный размер пролива.

Рассматривается диапазон времени от начала истечения до полного испарения пролива. Рекомендуется рассматривать дискретный набор состояний пролива с радиусами, отличающимися на 20%. В этом случае рассматривается череда облаков, распространяющихся от проливов различных последовательно реализующихся размеров пролива (т.е. рассматривается диапазон времени от начала истечения до полного испарения пролива). Эта череда облаков при оценке последствий взрыва рассматривается как единое облако.

При наличии положительной плавучести паров метана следует учитывать подъем выброса.

7.6. Распространение выброса под водой

Для расчета распространения газа внутри водной среды с последующим выходом газа на поверхность при разгерметизации подводного трубопровода используется вычислительный метод гидродинамики сглаженных частиц (англ. Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH).

7.7. Оценка последствий выброса при разрыве подводного газопровода ПРГУ

Оценку размеров вероятных зон действия выхода метана с поверхности моря рекомендуется определять по формуле:

$$R = 0.39 \cdot z \left[\frac{10.36 \cdot V_g}{z + 10.36} \right]^{1/3}, \quad (7-38)$$

где: z – глубина залегания газопровода, м;

V_g – объемный расход газа на поверхности, м³/с.

При этом следует понимать, что размер зоны выхода метана в определенной степени зависит от расхода выброса на месте разрушения трубопровода, который меняется достаточно существенно в течение нескольких десятков секунд.

Оценку размеров вероятных зон действия при горении метана при выходе с поверхности моря рекомендуется определять с использованием

расчетной модели, представленной в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

Для оценки и описания процесса генерации и распространения волн в воде от цилиндрического источника рекомендуется использовать следующую одномерную модель:

Уравнение сохранения количества движения:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -R^{\alpha-1} \frac{\partial P}{\partial M} \quad (7-39)$$

Уравнение сохранения массы:

$$V = R^{\alpha-1} \frac{\partial R}{\partial M} \quad (7-40)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial M} \left(I + \frac{U^2}{2} \right) = -\frac{\partial (R^{\alpha-1} P U)}{\partial M} \quad (7-41)$$

где: U – скорость частиц, м/с;

R – эйлерова пространственная координата, м;

α – коэффициент, равный 1, 2 и 3 в плоском, осесимметричном и сферически симметричном случаях соответственно;

P – давление, Па;

M – масса на единицу длины или на единицу телесного угла;

V – удельный объем, м³/кг;

I – внутренняя энергия, Дж.

Кроме того, справедливы соотношения:

$$\partial R / \partial t = U \text{ и } dm = \rho_0 r^{\alpha-1} dR \quad (7-42)$$

где: dM – элемент массы на единицу телесного угла (в случаях $\alpha = 2$ или $\alpha = 3$) или на единицу площади (в случае $\alpha = 1$);

$\rho_0 = I / V_0$;

V_0 – удельный объем в начальный момент времени.

Расчет моделирования рассеяния и сгорания облаков метана при выходе

с поверхности моря может быть смоделирован с помощью Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415, где учитывается и положительная плавучесть метана, и сложная трехмерная картина его рассеяния, и механизмы горения метано-воздушной смеси.

Приложение № 8
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённого приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 251

Примеры расчёта зон поражения при авариях на ОПО СПГ

Пример 1. Разгерметизация подводного газопровода.

В результате коррозии происходит разгерметизация подводного газопровода, требуется определить размеры пожароопасных зон над поверхностью воды.

Решение.

Согласно пункту 7.6. приложения № 7 Руководства в результате моделирования истечения газа в водной среде определяется радиус зоны выхода газа с поверхности воды. Далее, используя методы вычислительной гидродинамики по методологии, изложенной в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415, с использованием в качестве исходных данных количественных характеристик, полученных в предыдущем расчете, определяются размеры зоны с концентрациями в пределах $[0,5 \cdot \text{НКПР}, \text{ВКПР}]$. На рисунке 8-1 представлены примеры вертикальных сечений с распределениями концентраций метана в атмосфере в результате разгерметизации подводного газопровода.

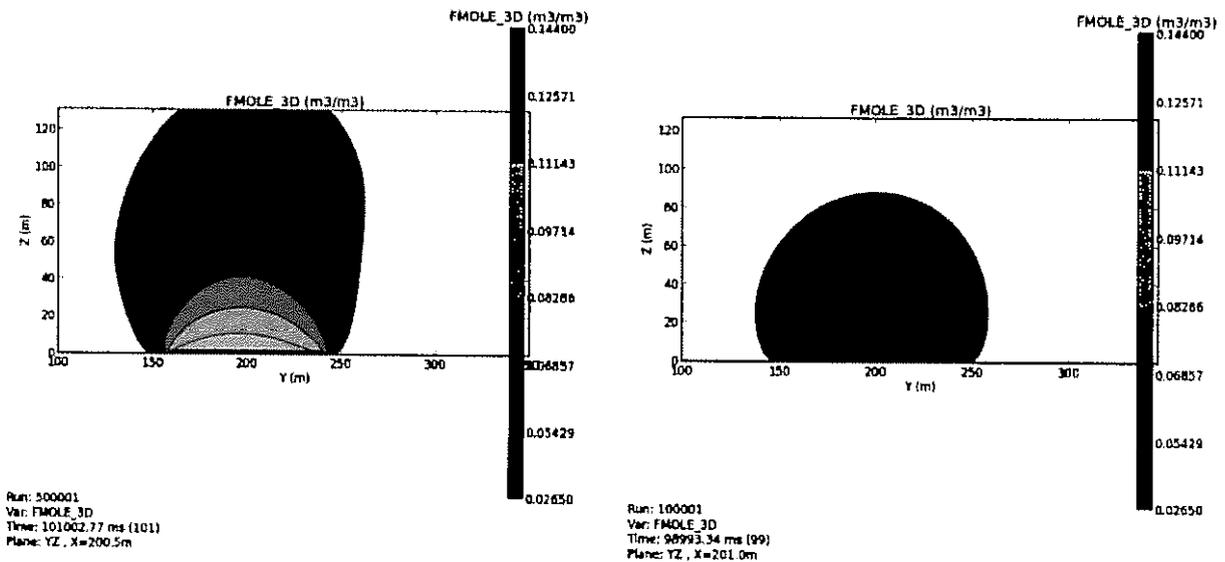


Рисунок 8-1. Пример вертикальных сечений с распределением концентрации от выхода метана с круговой поверхности с видимой зоной 0,5·НКПР (стационарные поля)

Пример 2. Взрыв топливно-воздушной смеси.

В результате разгерметизации фланца на подводящем трубопроводе к изотермическому резервуару СПГ происходит истечение СПГ внутрь обвалования резервуара с последующим испарением и распространением облака смеси метана с воздухом. Требуется определить величину избыточного давления в конкретной точке пространства при возникновении на пути облака источника зажигания и сгоранием облака с образованием волн избыточного давления.

Решение.

Согласно пункту 7.2. приложения № 7 Руководства проводится численный расчет аварийного истечения СПГ из трубопроводных систем, определяется аварийный расход, далее по пункту 7.3. приложения № 7 Руководства проводится расчет растекания, испарения (кипения) СПГ внутри обвалования. Полученные количественные характеристики используются в качестве исходных данных для расчетов распространения облака по интегральной модели Руководства по безопасности «Методика

моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утверждённого приказом Ростехнадзора от 2 ноября 2022 г. № 385, по которой определяются масса опасного вещества в пределах $[0,5 \cdot \text{НКПР}, \text{ВКПР}]$. Далее согласно Руководству по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей», утверждённому приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 412, по полученной массе определяется избыточное давление в конкретной точке пространства при быстром сгорании парогазовоздушной смеси. Для расчета в условиях расположения трубопровода в зоне крупных и сложных геометрических объектов расчет распространения пролива, испарения (кипения), распространения облака смеси метана с воздухом, а также сгорания облака, проводится методами вычислительной гидродинамики, описанными в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415. На рисунке 8-2 представлен пример типовой зависимости избыточного давления при сгорании облака ТВС в конкретной точке пространства.

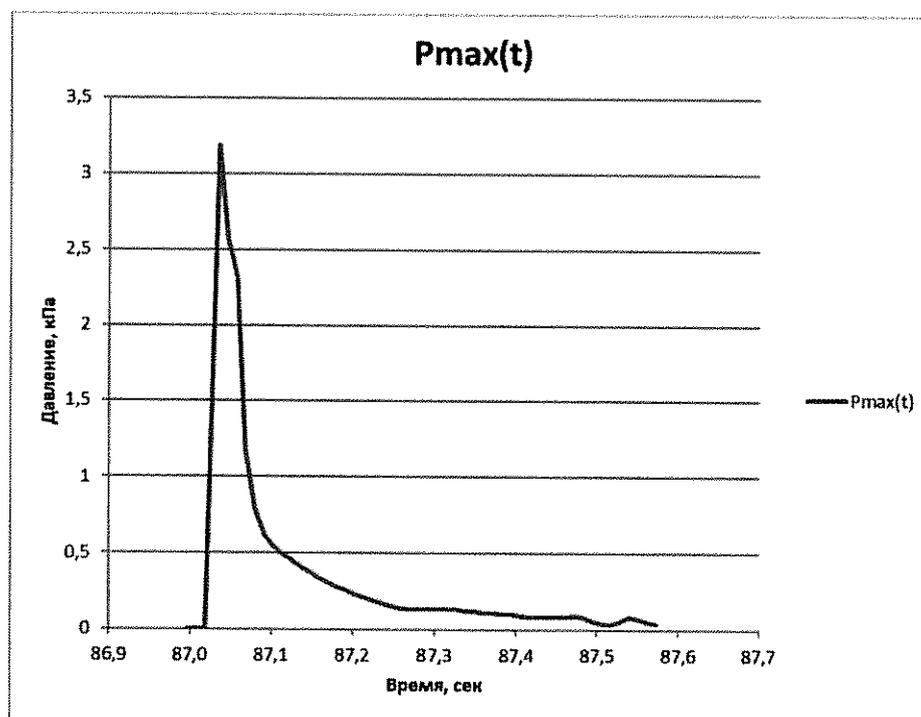


Рисунок 8-2. Типовая временная зависимость давления при сгорании облака «метан-воздух», образовавшегося при эмиссии (штиль)

Пример 3. Диффузионное горение.

В результате частичной разгерметизации оборудования с избыточным давлением на ПРГУ и воспламенения струи газа образовался вертикальный факел. Требуется определить детерминированные зоны поражения тепловым излучением.

Решение.

Согласно Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах определяются: аварийный расход газа, геометрические размеры факела, распределение теплового излучения от факела в пространстве. На основе указанного распределения и детерминированных критериев поражения тепловым излучением определяются зоны поражения людей, зоны воздействия на оборудование и на другие объекты. На рисунке 8-3 представлен пример зон поражения от вертикального факела на ПРГУ.

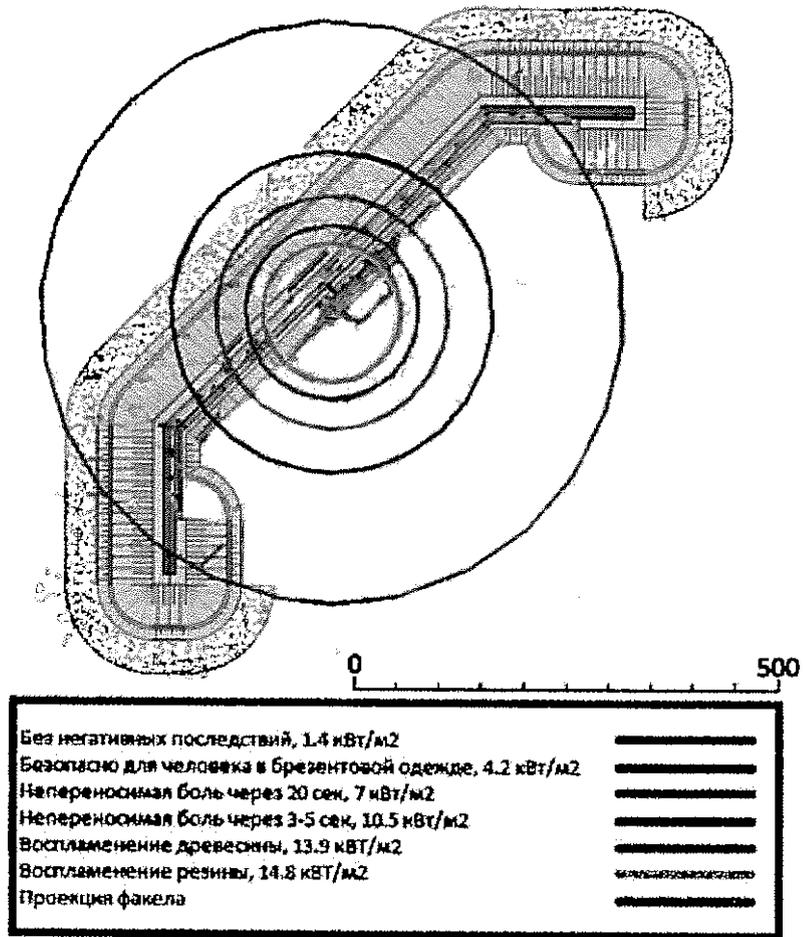


Рисунок 8-3. Пример зон поражения от вертикального факела при аварии на ПРГУ

Приложение № 9
к Руководству по безопасности
«Методические рекомендации по проведению
анализа риска на объектах производства,
транспортировки, хранения, отгрузки и
использования сжиженного природного газа»,
утверждённому приказом Ростехнадзора
от «09» августа 2024 г. № 251

**Критерии поражения людей, разрушения оборудования,
зданий и сооружений**

Количественные детерминированные и вероятностные критерии поражений людей, повреждения, разрушения зданий, сооружений при барическом, термическом и осколочном воздействии изложены в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 года № 387.

При криогенном (низкотемпературном) воздействии поражение, травмирование человека в виде криогенных (холодовых) ожогов, обморожений может произойти при попадании человека в зону поражения, контакте с криогенными (низкотемпературными) жидкостями и парами (повреждение легких), прикосновении к охлажденным конструктивным элементам.

При анализе аварий с выбросами СПГ и других криогенных (низкотемпературных) жидкостей рекомендуется рассматривать возможность нанесения холодовых травм человеку в результате контакта с криогенными (низкотемпературными) жидкостями, аэрозолями и парами согласно следующим критериям ¹² :

- 1) при попадании в зону пролива и/или струйного истечения

¹² Источник: Risk Assessment data directory. Vulnerability of humans. Report 434-14. // International association of Oil and Gas Producers. July 2023.

жидкости: смертельный исход (вероятность поражения равна 1) при температуре жидкости -60°C и ниже; отсутствие воздействия (вероятность поражения 0) при температуре жидкости -20°C и выше; вероятность поражения при воздействии иных температур определяется линейной интерполяцией между точками 0 и 1;

2) при попадании в зону облака опасного вещества без аэрозоля: смертельный исход с вероятностью 0, 0,1, 0,6, 1 при температуре в облаке от -70°C , -113°C , -160°C , -180°C . Вероятность поражения при воздействии иных температур определяется линейной интерполяцией между точками 0, 0,1, 0,6, 1;

3) для струй, содержащих паровую и жидкую фракции, вероятность смертельного поражения определяется по линейной интерполяции между вероятностями гибели при заданной температуре в облаке чистого газа и чистой жидкости пропорционально массовым долям.

Температуру аварийного выброса рекомендуется определять по термодинамическим расчетам, а не по величине температуры потока в штатном режиме, так как температура потока может существенно уменьшиться вследствие падения давления.

Критерии повреждения, разрушения при криогенном (низкотемпературном) воздействии рекомендуется определять по проектной документации исходя из консервативного допущения, что разрушению могут подвергаться любые металлоконструкции, температура которых в результате криогенного (низкотемпературного) воздействия жидкости или газа опустится до уровня ниже критической температуры (температура, при которой происходит хрупкое разрушение или разрушение опор/конструкций, оборудования вследствие воздействия низких температур). Указанная критическая температура охрупчивания материала может быть использована для обоснования мер криогенной защиты. Критерии могут быть скорректированы с учетом климатических условий эксплуатации, в том числе минимальной величины расчетной температуры наружного воздуха, мер

криогенной защиты, материала конструкций, длительности воздействия и иных факторов, а также требований механической безопасности.

Фазовый состав выброса, температура выброса, размеры низкотемпературной зоны (зоны поражения) с учетом критической температуры оцениваются в соответствии с Руководством по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утверждённом приказом Ростехнадзора от 2 ноября 2022 г. № 385, и Руководством по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», утверждённом приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415.

В качестве примера для оценки риска криогенного (низкотемпературного) воздействия ниже приводятся следующие критерии для конструкций и оборудования ¹³:

струи жидкости (в том числе распыленной) или проливы с температурой $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁴ и ниже продолжительностью воздействия не менее 1 минуты (для стали);

струи пара с температурой $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже при продолжительности воздействия более 20 минут (для стали);

струи жидкости (в том числе распыленной) или проливы при следующих характеристиках (для бетонных сооружений):

- температура от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ продолжительностью воздействия не менее 20 минут;

- температура от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ продолжительностью воздействия не менее 10 минут.

При необходимости, с учетом указанных выше критериев, может быть

¹³ Критерии приведены на основе документации по проекту «Арктик СПГ-2».

¹⁴ Значение температуры выбрано согласно п. 4.2.3 СП 16.13330.2017 для размещения ОПО в районе полуострова Гыдан в ЯНАО.

определена частота разрушения стальных или бетонных конструкций в результате аварийных выбросов, а также выполнены расчеты поля частот криогенных (низкотемпературных) воздействий с учетом типа конструкции.

Для снижения консервативности размеров зон поражения рекомендуется использовать методики численного моделирования, позволяющие учесть наличие объектов-препятствий в помещениях, модулях производств СПГ.
