

АНАЛИЗ РИСКА ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

С.М. ЛЫКОВ, А.И. ГРАЖДАНКИН, М.В. ЛИСАНОВ, канд. физ.-мат. наук,
А.С. ПЕЧЕРКИН, д-р техн. наук, Е.В. ХАНИН (ГУП «НТЦ «Промышленная
безопасность»), С.И. СУМСКОЙ (МИФИ)

Газонаполнительные станции (ГНС) — пространственные опасные производственные объекты, предназначенные для приема, хранения и снабжения населения сжиженными углеводородными газами (СУГ) — пропаном, бутаном и их смесями в баллонах, а также для поставки газа в автоцистернах в качестве заправочного топлива для автомобилей. Основные технологические операции, проводимые на ГНС, — сливно-наливные, связанные с приемом и отпуском СУГ потребителям.

Наличие значительных (до нескольких сотен тонн) запасов СУГ на ГНС и высокая потенциальная опасность СУГ¹ позволяют отнести ГНС к опасным производственным объектам, которые могут представлять опасность не только для персонала, но и для населения. В настоящей статье изложены основные результаты анализа риска, проведенного при составлении декларации промышленной безопасности типичной ГНС.

1. Общие сведения

Производственная мощность рассматриваемой ГНС составляет 10 тыс. т СУГ в год, доставляемых от поставщиков в железнодорожных цистернах. Это количество СУГ распределяется следующим образом: на заправку бытовых газовых баллонов — 8000; вывозится автоцистернами потребителю — 1500; на заправку газобаллонных автомобилей на автомобильной газозаправочной станции (АГЗС), находящейся рядом с ГНС, — 500 т/год.

Максимальное количество СУГ, которое одновременно может находиться на ГНС, — 500 т.

В составе ГНС имеются: железнодорожная эстакада для одновременного приема четырех цистерн объемом по 54 м³; хранилище СУГ — 12 подземных резервуаров объемом по 100 м³ каждый; насосно-компрессорное отделение (пять

насосных и два компрессорных агрегата); наполнительное отделение (для наполнения бытовых баллонов вместимостью 27 л) с погрузочно-разгрузочными площадками; колонка для наполнения автоцистерн; АГЗС (операторная, топливно-раздаточная колонка для легковых автомобилей, заглубленный резервуар запаса топлива объемом 10 м³).

По территории ГНС проложены наземные трубопроводы, соединяющие железнодорожную эстакаду, хранилище СУГ, насосно-компрессорное отделение, наполнительное отделение, АГЗС и колонку для наполнения автоцистерн. На территории ГНС имеется также ряд вспомогательных объектов для обеспечения работы ГНС.

Максимальное число работающих в смену на ГНС — 30 чел.; на территории ГНС могут находиться также третьи лица (люди), приехавшие с целью получить сжиженный газ.

Рассматриваемая ГНС расположена на равнинной слабопересеченной местности. В 50 м от границ ГНС находится автодорога III категории, а в 80 м — железная дорога. До ближайшего населенного пункта 700 м.

2. Выявление причин аварийных ситуаций и определение сценариев их развития

Анализ риска рассматриваемого объекта включает следующие этапы:

определение возможных причин и факторов, способствующих возникновению и развитию аварий, и типовых сценариев возможных аварий;

оценку количества опасных веществ, участвующих в аварии, а также возможного числа пострадавших и расчет вероятных зон действия поражающих факторов; обобщение оценок риска и сравнение их значений с критериями приемлемого риска.

Анализ происшедших аварий на аналогичных объектах позволяет выделить три взаимосвязанные группы причин, способствующих возникновению и развитию аварий:

¹ СУГ легко переходит в газовую фазу, которая при смешении с воздухом образует взрывоопасные смеси.

отказы оборудования (коррозия, физический износ, механические повреждения, ошибки при проектировании и изготовлении — раковины, дефекты в сварных соединениях; усталостные дефекты металла, не выявленные при освидетельствовании; нарушение режимов эксплуатации — переполнение емкостей, несоблюдение скорости перекачки СУГ, превышение давления);

ошибки персонала (при приеме СУГ из железнодорожных цистерн, отпуске СУГ потребителям — наполнении автоцистерн, заправке газобаллонных автомобилей; наполнении бытовых баллонов, их погрузке, операциях слива переполненных и отбракованных баллонов; отборе проб СУГ из резервуаров; подготовке оборудования к ремонту, проведении ремонтных и профилактических работ; пуске и останове оборудования; локализации аварийных ситуаций);

нерасчетные внешние воздействия природного и техногенного характера (штормовые ветры и ураганы, снежные заносы, ливневые дожди, грозовые разряды, механические повреждения, диверсии).

Основные аварийные ситуации на рассматриваемом объекте связаны с разрушением (полным или частичным) емкостного оборудования, трубопроводов или насосов, поэтому именно эти варианты аварий и выбираются в качестве типовых сценариев. Например, на железнодорожной эстакаде возможны следующие сценарии.

Сценарий Ж₁. Разрушение (полное или частичное) железнодорожной цистерны с СУГ, истечение СУГ, вскипание перегретой жидкости и образование из нее охлажденных до температуры кипения газовой фазы и аэрозольных капель, пролив жидкой фазы на подстилающую поверхность, растекание, кипение и испарение жидкой фазы с поверхности; интенсивное смешение с воздухом, рассеяние газокапельного облака СУГ (первичное и вторичное облако), воспламенение облака и (или) жидкой фазы при наличии источника зажигания, горение пролива и облака топливно-воздушных смесей (ТВС), воздействие ударных волн, открытого пламени и теплового излучения на людей и близлежащие объекты (в том числе образование огненных шаров при попадании в пожар соседних цистерн или аварийной цистерны с СУГ).

Сценарий Ж₂. Разрушение (полное или частичное) сливного (наливного) трубопровода с СУГ, струйное истечение СУГ до срабатывания клапана безопасности, вскипание перегретой жидкости и образование из нее охлажденных до температуры кипения газовой фазы и аэрозольных капель, пролив жидкой фазы на подстилающую

поверхность, растекание, кипение и испарение жидкой фазы на подстилающей поверхности; интенсивное смешение с воздухом, рассеяние газокапельного облака СУГ (первичное и вторичное облако), воспламенение облака и (или) жидкой фазы при наличии источника зажигания, горение пролива и облака ТВС, возникновение факела на месте разрушения, воздействие ударных волн, открытого пламени и теплового излучения на людей и близлежащие объекты (в том числе образование огненных шаров при попадании в пожар цистерн с СУГ).

Сценарии, подобные Ж₁, но с учетом специфики размещения и эксплуатации оборудования, возможны с резервуарами хранилища СУГ, автоцистерной, резервуаром АГЗС.

Сценарии, подобные Ж₂, возможны на системе трубопроводов к потребителю, обвязке резервуаров, наполнительной колонке автоцистерн, АГЗС. В качестве типовых сценариев возможных аварий рассматривались взрывы в резервуаре и бытовом баллоне; разгерметизация насоса.

Рассматриваемые сценарии аварии включают в себя и сценарии, развитие которых сопровождается так называемым «эффектом домино», который отражен в приведенных выше схемах на последних этапах развития аварии — «воздействие ударных волн, осколков, открытого пламени и теплового излучения на близлежащие объекты». В зависимости от степени воздействия поражающих факторов на объекты, близлежащие к месту аварии, возможны либо дальнейшее развитие аварии, либо ее локализация и ликвидация.

В общем случае описанные выше схемы развития аварии (сценарии Ж₁ и Ж₂) являются группами сценариев и включают в себя несколько различных путей, по которым может развиваться авария. Например, на рис. 1 приведено «дерево событий» для аварии на трубопроводе. Более того, при определении конкретных последствий для различных условий протекания аварии (характер и место разрушения, условия в окружающей среде и т.д.) число параметров реализации того или иного сценария существенно возрастает. Для рассматриваемой ГНС условия развития аварии принимались разными в следующих случаях: для каждого месяца принималась соответствующая температура окружающей среды; для разных времен суток брались различные условия рассеяния выброса и температуры; рассматривались восемь направлений ветра с интервалом 45°; для трубопроводов анализировались аварии с шагом 5 м по длине трубопровода.

В целом на объект было просчитано свыше 22 тыс. аварийных ситуаций.

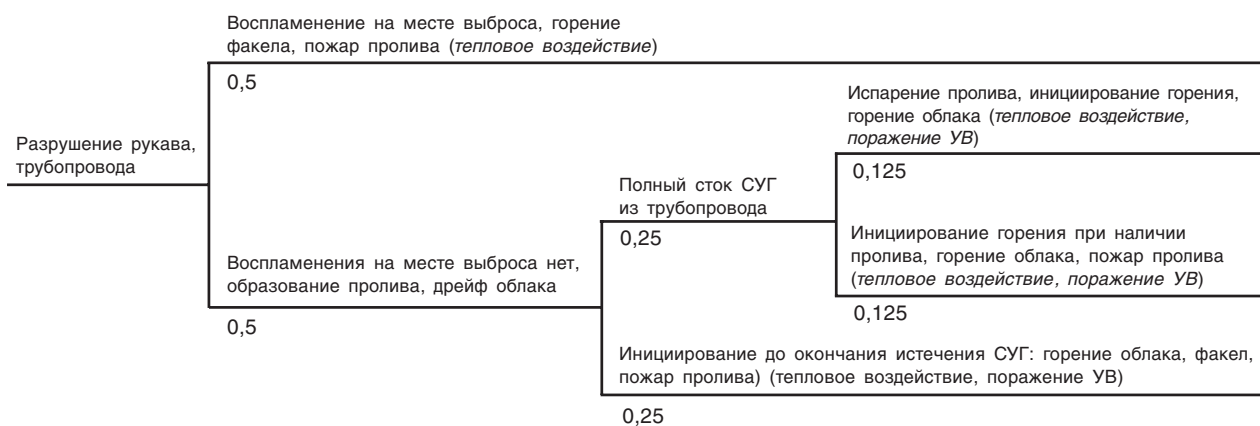


Рис. 1. «Дерево событий» развития аварий при разрыве трубопроводов, рукавов

Для количественного анализа риска последствий аварий использована следующая нормативная документация: Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (разработана НТЦ «Промышленная безопасность», утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.01 № 25); Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. Office of Environmental and Scientific Affairs. The World Bank (Методика Всемирного Банка) — для расчета зон воздействия при горении факелов и рассеянии облаков топливно-воздушных смесей; ГОСТ Р 12.3.047—98 — для оценки последствий огненного шара и пожара пролива.

3. Определение размеров зон возможного поражения

Радиусы возможного поражения при авариях на ГНС колеблются от одного до нескольких сотен метров. Например, для аварий на железнодорожной эстакаде (сценарии Ж₁ и Ж₂) радиусы смертельного поражения человека с условной вероятностью 0,1 составят 180 м при образовании огненного шара; 40 м при пожаре пролива и 37 м при горении факела. Расстояние, на которое может дрейфовать облако СУГ, сохраняя способность к воспламенению, составит до 560 м. Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися данными по радиусам поражения, наблюдавшимся в реальных авариях с сопоставимыми количествами СУГ. Например, 9 декабря 1970 г. в Порт Хадсоне (штат Миссури, США) в результате разрыва подземного трубопровода было выброшено около 60 т сжиженного пропана. При этом образовалось облако высотой 3–6 м и протяженностью 490 м. Оно дрейфовало до тех пор,

пока не достигло строений, где от искры воспламенилось (задержка воспламенения составила 24 мин). Произошли сильный взрыв и последующее сгорание переобогащенной части облака. Зоны поражения соответствовали взрыву тротила в 45 т. В наших расчетах расстояние, на котором облако, образовавшееся при выбросе около 50 т СУГ (разрушение резервуара в хранилище СУГ), сохраняло способность к воспламенению на расстоянии до 620 м. В Линчберге (штат Виргиния, США) 9 марта 1972 г. при образовании огненного шара из 10 т пропана на расстоянии 130 м получили ожоги 3 чел., один из них погиб; на расстоянии 140 м 3 чел. хотя и получили ожоги различной степени тяжести, но остались живы. Такие последствия аварии позволяют принять в качестве размера зоны смертельного поражения с условной вероятностью 1/3, расстояние 130 м. По нашим расчетам, размер зоны смертельного поражения с условной вероятностью 1/3 для огненного шара из 10 т пропана составляет 105 м.

Сравнение рассчитанных и наблюдавшихся на практике зон поражения при горении проливов и факелов показывает, что использованные модели дают удовлетворительную точность расчета.

4. Определение количества пострадавших

Результаты анализа размеров зон поражения при всевозможных сценариях аварий подтверждают, что на рассматриваемой ГНС при любой аварии, связанной с разрушением одной единицы оборудования, поражающие факторы не приведут к прямому смертельному поражению людей в близлежащих населенных пунктах, находящихся на расстоянии более 700 м от ГНС. Однако в зону возможного поражения попадают близле-

жащие автомобильная и железная дороги и, конечно, сама территория ГНС.

Возникает вопрос, какое количество людей может пострадать при авариях на ГНС? В зависимости от сценария аварийной ситуации и от количества СУГ, вовлекаемого в аварию, число пострадавших может изменяться в широких пределах. При аварии в помещении наполнительного отделения могут погибнуть все находящиеся в нем люди (до 3 человек); взрыве паров СУГ внутри резервуара — до 2 человек; образовании горящих проливов и факелов (при разгерметизации трубопроводов и арматуры) возможна гибель до 2 человек, находящихся на территории объекта и попавших в зону смертельного поражения тепловым излучением. Следует отметить, что при пожарах проливов и горении факела люди, находящиеся за пределами объекта, в том числе перемещавшиеся по дорогам, в зону поражения не попадают. При образовании огненных шаров или сгорании дрейфующих газовых облаков возможна гибель всех людей, находящихся на территории объекта (до 30 человек, работающих в смене), а также поражение людей за пределами ГНС; при этом наиболее опасными с точки зрения поражения при горении облаков являются аварии на железнодорожной эстакаде и в резервуарном парке при юго-западном ветре, когда на пути облака оказывается сразу несколько зданий.

Следует отметить, что приведенные оценки количества погибших — пессимистические. В реальной ситуации число погибших не превышает 10 человек, поскольку в ряде случаев люди могут выйти из зоны поражения.

Число пострадавших при попадании в зону поражения автодороги или железнодорожных путей будет зависеть от интенсивности движения. Люди, передвигающиеся по автомобильной и железной дорогам, могут пострадать лишь при возникновении огненного шара или воспламенении дрейфующего облака (для автодороги дрейф и воспламенение облака при юго-восточном, восточном или северо-восточном ветрах; для железной дороги дрейф и воспламенение облака при юго-западном, западном или северо-западном ветрах). Причем при горении облака поражение в районе дорог возможно при условии, что оно не воспламенилось на пути дрейфа; воспламенение произошло при попадании транспортных средств во взрывоопасное облако.

На автомобильной дороге в зону поражения попадет до 6 чел. (два легковых автомобиля). При движении в момент аварии по автодороге пассажирского автобуса в зоне поражения окажутся все его пассажиры. Число пострадавших на

железной дороге может достигать 140 чел. при попадании в зону поражения пассажирского поезда.

5. Оценка риска

Полученные данные о размерах зон поражения и количестве пострадавших дают представления о масштабах возможных аварий на ГНС. Однако для полноты представления об уровне опасности объекта необходимо знать не только масштабы, но и частоту возникновения возможных аварий или потерь.

Для оценки вероятности реализаций опасности и показателей риска использовались статистические данные по отказам применяемых технических устройств, экспертные оценки и метод «дерева событий» (в соответствии с РД 08-120—96).

Выбор значений частот иницирующих событий проведен на основе обобщенных статистических данных с учетом того, что на объекте используется современное технологическое оборудование (резервуары и трубопроводы с двойными стенками, средства КИПиА и противоаварийной защиты). При определении частоты возникновения аварии учитывалась интенсивность эксплуатации оборудования в течение года.

Соответствующие вероятности исхода того или иного сценария определялись по «дереву событий» (см. рис. 1) и вероятности иницирующих событий. По всем группам сценариев определено пространственное распределение потенциального территориального риска, показывающее частоту смертельного поражения (год^{-1}) в каждой точке территории декларируемого объекта и на прилегающих площадях. Схема расположения ГНС и распределение потенциального территориального риска представлены на рис. 2.

На основе полученного пространственно-временного распределения потенциального риска, а также с учетом распределения людей на территории декларируемого объекта, прилегающих площадей, близлежащих автомобильной и железной дорог, определены коллективные риски гибели различных категорий людей (возможное число погибших в год). В табл. 1 приведены полученные значения коллективных рисков при возникновении аварий на декларируемом объекте. По значению коллективных рисков и количеству людей, попадающих под воздействие поражающих факторов, оценены средние индивидуальные риски различных категорий людей (табл. 2).

В целом указанные показатели риска значительно ниже фоновых показателей риска, связанных с обыденной жизнью человека. Для сравнения частота смерти от неестественных причин в Рос-

Таблица 2

Категория людей	Индивидуальный риск, 1/год
Персонал на территории декларируемого объекта	$3,75 \cdot 10^{-5}$
Третьи лица на территории, прилегающей к декларируемому объекту	До $4,6 \cdot 10^{-7}$
Пассажиры:	
автотранспортных средств	До $1,5 \cdot 10^{-8}$
поездов железной дороги	До $1,1 \cdot 10^{-9}$

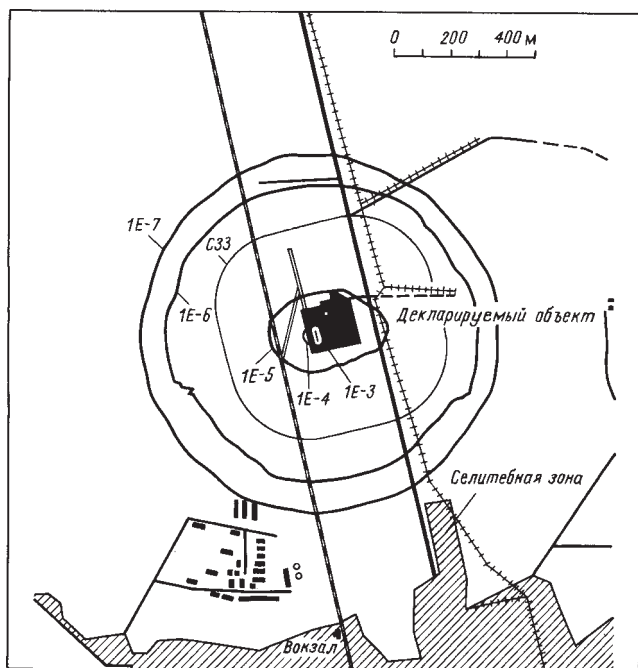


Рис. 2. Схема расположения ГНС и распределение потенциального территориального риска, отображающего частоту возникновения поражающих человека факторов от возможных аварий на ГНС за год (обозначение частоты $1E-N$ соответствует значению 10^{-N} , размерность частоты — 1/год)

сии (1987 г.) составляла — $(1-1,7) \cdot 10^{-3}$ год⁻¹; риск убийства и самоубийства (1991 г.) — $2,6 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹; риск гибели в происшествиях с подвижным составом (1988 г.) — $1,6 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹; риск гибели в дорожно-транспортных происшествиях в Московской обл. (1991 г.) — $2,7 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. Индивидуальный риск гибели для населения (на автомобильной и железной дорогах и на террито-

рии, прилегающей к декларируемому объекту) укладывается в пределы верхней оценки гибели населения в результате техногенной чрезвычайной ситуации в России (1989 г.) — $2,4 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Помимо коллективных и средних индивидуальных рисков определен социальный риск, отражающий связь между тяжестью последствий и частотой их возникновения (F/N кривая). На рис. 3 показана частота возникновения (в год) смертельного поражения людей из персонала ГНС больше определенного числа. Из рисунка видно, что основная доля аварий (более 95 %) приведет к гибели только одного человека. Исходя из данных, представленных на рис. 3, можно выделить три уровня опасности:

первый соответствует гибели до 2 человек. Это ситуации, включающие в основном пожар проливов и горение факелов: частота их возникновения $2 \cdot 10^{-5}$ – $1,6 \cdot 10^{-3}$ раза в год; второй — может погибнуть до 18 человек. Частота их возникнове-

Таблица 1

Категория людей	Число пострадавших, чел/год
Персонал на территории декларируемого объекта	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Третьи лица на территории декларируемого объекта	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Третьи лица на территории, прилегающей к декларируемому объекту	$3,14 \cdot 10^{-5}$
Все категории	$2,9 \cdot 10^{-3}$

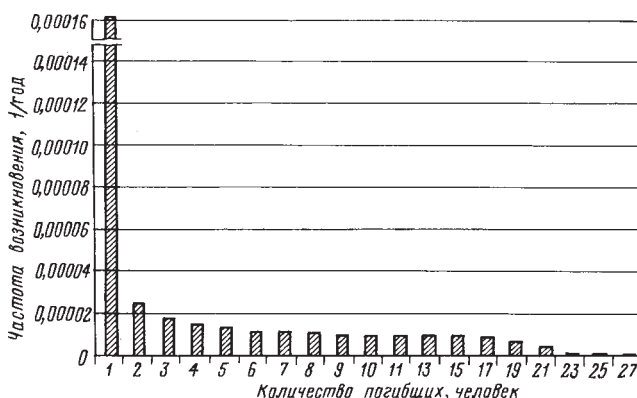


Рис. 3. Частота возникновения аварийных ситуаций, приведших к гибели персонала

ния около $1 \cdot 10^{-5}$ раза в год; в основном ситуации, связанные с воспламенением дрейфующих облаков в местах сосредоточения большого количества людей; третий — гибель свыше 20 человек с частотой $1 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ раза в год. Это ситуации, связанные в основном с образованием огненных шаров.

6. Анализ влияния различных факторов на показатели риска

Приведенные показатели риска отражают состояние ГНС на некоторый конкретный момент времени, соответствующий определенному состоянию оборудования и режиму эксплуатации (1–3 года). Представляется важным выяснить, как различные факторы, связанные с изменениями на объекте, отразятся на показателях риска. Например, со временем износ оборудования приведет к увеличению частоты возникновения отказов на ГНС и соответственно к риску вероятности возникновения аварийных ситуаций. Так, при увеличении частоты разгерметизации оборудования на порядок, показатели риска для всех категорий людей возрастут с $2,9 \cdot 10^{-3}$ до $5,4 \cdot 10^{-3}$ чел/год; средний индивидуальный риск для персонала объекта — с $3,75 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹; для третьих лиц — пассажиров автотранспортных средств и железнодорожных составов — риск увеличится в 10 раз (с $1,7 \cdot 10^{-7}$ до $1,7 \cdot 10^{-6}$ и с $1,1 \cdot 10^{-8}$ до $1,1 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹ соответственно).

Существенным образом на показатели риска влияет профессиональная и противоаварийная подготовка персонала. Приведенные значения показателей риска соответствуют тому факту, что персонал ГНС прошел соответствующее обучение и профессиональную подготовку, в том числе подготовку по локализации и ликвидации аварий. Некачественная подготовка персонала может привести к ошибкам в процессе ведения технологического процесса и в поведении при возникновении аварийной ситуации. Например, если персонал не сможет выйти из зоны возможного поражения, то показатели риска увеличатся и коллективный риск составит $2,4 \cdot 10^{-2}$ против $1,8 \cdot 10^{-3}$ чел/год. И наоборот, при успешной реализации мер по предотвращению развития аварии с эффектом «домино», например, на железнодорожной эстакаде, коллективный риск уменьшится с $1,8 \cdot 10^{-3}$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$ чел/год. Конкретным технологическим решением, способствующим предотвращению эффекта «домино» на железнодорожной эстакаде, может стать увеличение длины тупикового пути от эстакады

до упорного бруса и установление на нем лебедки для растаскивания цистерн при возникновении пожара на эстакаде.

По результатам анализа предложено 14 технических мероприятий по снижению риска возникновения аварийных ситуаций и уменьшению тяжести последствий аварий (в том числе мероприятия по улучшению конструкции насосов и компрессоров, установке дополнительных обвалований и др.). Существенному снижению риска третьих лиц способствуют и некоторые организационные мероприятия. Например, своевременное прекращение движения транспорта по автомобильной и железной дорогам при возникновении аварийных ситуаций на ГНС сведет риск поражения пассажиров транспортных средств практически к нулю.

7. Выводы

На основе применения методов количественного анализа риска для оценки безопасности типовой ГНС:

1. Проанализированы возможные причины возникновения, сценарии и условия протекания аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией оборудования и выбросом СУГ (смеси пропана с бутаном).

2. Рассчитаны возможные зоны поражения и количество пострадавших при более чем 22 тыс. сценариев аварий (включая горение облаков, пожары пролива, огненного шара и горящих струй).

3. Получены количественные оценки риска, в том числе вероятности возникновения и развития различных сценариев аварий, показатели индивидуального, коллективного, социального рисков, распределения потенциального территориального риска по объекту и окружающей местности.

4. Отмечено, что эксплуатация ГНС не создает опасности для людей, находящихся в близлежащих населенных пунктах, в том числе при возможном дрейфе топливовоздушной смеси; индивидуальный риск гибели персонала и третьих лиц (в том числе находящихся на заправке газа, автомобильной и железной дорогам) не превышает фоновые показатели риска обыденной жизнедеятельности человека.

5. Разработано 14 технических и 4 организационных мероприятия по обеспечению промышленной безопасности, при выполнении которых риск эксплуатации данного опасного производственного объекта может считаться допустимым и приемлемым.