

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации  
последствий стихийных бедствий

Воронежский институт –  
филиал ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия  
Государственной противопожарной службы»

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Всероссийский ордена „Знак Почета“ научно-исследовательский институт  
противопожарной обороны»

С. А. Шевцов, Д. В. Каргашилов, Л. П. Вогман

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА**

Учебное пособие

*Допущено Министерством Российской Федерации по делам гражданской  
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных  
бедствий в качестве учебного пособия для курсантов, студентов  
и слушателей образовательных организаций МЧС России*



Воронеж

Издательско-полиграфический центр  
«Научная книга»

2018

УДК 629.3.082:614.84  
ББК 38.743-082н6  
ШЗ7

Рецензенты:

д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры пожарной безопасности технологических процессов Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, *С. А. Швырков*;

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, *С. А. Горячев*;

д-р техн. наук, доцент, начальник отдела нефтепродуктов ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Федерального агентства по государственным резервам,

*И. А. Корольченко*

**Шевцов, С. А.**

ШЗ7      Определение величин пожарного риска на производственных объектах хранения сжиженного углеводородного газа [Текст] : учебное пособие / С. А. Шевцов, Д. В. Каргашилов, Л. П. Вогман. — Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2018. — 89 с.

ISBN 978-5-4446-1119-7

В учебном пособии, составленном в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность», рассмотрены технологии хранения, отпуска и подачи сжиженного углеводородного газа в системах автономного газозенергоснабжения и на автомобильных газозаправочных станциях. Представлен анализ пожарной опасности сжиженного углеводородного газа и параметров технологического процесса его хранения. На примере автомобильной газозаправочной станции проведен расчет индивидуального пожарного риска на основе действующих нормативных документов, по результатам которого сделан вывод о соответствии объекта защиты требованиям пожарной безопасности.

Учебное пособие предназначено для обучающихся в образовательных учреждениях МЧС России.

УДК 629.3.082:614.84

ББК 38.743-082н6

© Шевцов С. А., Каргашилов Д. В.,

Вогман Л. П., 2018

© Воронежский институт - филиал Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, 2018

© ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2018

© Оформление.

Издательско-полиграфический

центр «Научная книга», 2018

ISBN 978-5-4446-1119-7

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Основные понятия и определения.....	12
Общие сведения.....	16
Глава 1. Технологии хранения СУГ.....	23
1.1. Технологическая схема автономной системы газо, энергоснабжения.....	23
1.2. Технологическая схема автозаправочного комплекса СУГ.....	24
1.3. Способы хранения СУГ.....	25
1.4. Примеры практического применения систем автономного газоснабжения СУГ.....	30
1.5. Примеры практического применения АЗС с наличием газового моторного топлива.....	33
Глава 2. Оценка пожарного риска объекта хранения СУГ.....	36
2.1. Анализ пожарной опасности технологической среды, Физико-химические свойства СУГ.....	36
2.2. Анализ пожарной опасности параметров технологического процесса хранения СУГ.....	38
2.3. Возможные источники зажигания на объекте хранения СУГ в резервуарах.....	39
2.4. Расчет индивидуального пожарного риска объекта хранения СУГ в резервуарах под давлением.....	39
2.4.1. Исходные данные для расчета индивидуального пожарного риска.....	40
2.4.2. Иницирующие пожароопасные ситуации события для наземного одностенного резервуара СУГ...	41
2.4.3. Построение логических деревьев событий при разгерметизации резервуара СУГ.....	42
2.4.4. Последовательность расчета частот реализации сценариев пожароопасных ситуаций при разгерметизации резервуара с СУГ.....	46
2.4.5. Опасные факторы пожара для различных сценариев развития пожароопасных ситуаций.....	54
2.4.5.1. Масса СУГ, испарившегося с поверхности пролива.....	54

2.4.5.2. Прогнозирование радиуса взрывоопасной зоны.....	55
2.4.5.3. Прогнозирование радиуса зоны поражения при пожаре-вспышке.....	56
2.4.5.4. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления.....	57
2.4.5.5. Расчет интенсивности теплового излучения при пожаре проливе.....	60
2.4.5.6. Расчет интенсивности теплового излучения при возникновении огненного шара.....	63
2.4.5.7. Расчет зоны поражения от воздействия факела при струйном горении СУГ.....	64
2.4.6. Оценка последствий воздействия ОФП на человека.....	67
2.4.6.1. Детерминированные и вероятностные критерии оценки поражающего действия опасных факторов пожара на человека.....	67
2.4.6.2. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением пожара-вспышки.....	67
2.4.6.3. Условная вероятность поражения человека при быстром сгорании (взрыве) газозадушной смеси в открытом пространстве.....	68
2.4.6.4. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением пожара пролива.....	69
2.4.6.5. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением огненного шара.....	70
2.4.6.6. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением при факельном горении СУГ.....	70
2.4.6.7. Условная вероятность поражения человека от совместного независимого воздействия нескольких ОФП.....	72
2.4.7. Индивидуальный пожарный риск для клиентов АГЗС.....	73
2.4.8. Соответствие технологического процесса хранения СУГ в одностенном резервуаре на территории АГЗС уровню пожарной безопасности.....	76
Заключение.....	82
Список литературы.....	84

## ВВЕДЕНИЕ

Сжиженный углеводородный газ (СУГ) – это синтетическое топливо, содержащее легкие углеводороды, находящиеся в жидком состоянии при условиях небольшого избыточного давления и нормальной температуры. Его получают из нефти и сконденсированных нефтяных попутных газов или при добыче и переработке газа. Основными компонентами смеси являются пропан и бутаны в различных пропорциях [8].

Ухудшение экологической ситуации, ограниченное количество природных ископаемых источников энергии, труднодоступность разработки новых месторождений, постоянное удорожание энергоносителей делает использование СУГ весьма привлекательным в последнее время. Этот газ обладает высокой теплотворной способностью, экологичностью сгорания, он удобен при хранении и транспортировке в сжиженном виде. Многие страны мира уже несколько десятилетий применяют его для хозяйственных нужд и в промышленности.

Использование углеводородного газа в мире увеличилось со 150 млн. тонн в 1990 году до более 200 млн. тонн в настоящее время. Россия производит более 14 миллионов тонн СУГ в год, и большую часть из них использует на собственные нужды. В связи с неуклонным ростом потребления СУГ в мире, предполагается, что его выработка к 2020 году будет оцениваться в 300 млн. тонн в год [28].

Область применения СУГ достаточно широка. На сегодняшний день можно выделить четыре основные сферы применения СУГ – в коммунальном и промышленном секторах, транспорте и нефтехимии.

Почти половина объема расходуемого в мире сжиженного газа используется в коммунально-бытовом секторе. Разнообразные системы газификации на пропан-бутане обслуживают большое количество различных потребителей. Спектр этот

весьма широк: отопление частных домов и приготовление в них пищи, генерация тепла в крупных поселках, больших складских и торговых зданиях и других жилых и промышленных объектов.

В настоящее время в мировой практике для газотеплоснабжения жилых и промышленных объектов, которые удалены от основных пунктов энергоснабжения, все более широко используются автономные системы газотеплоснабжения потребителей, снабжаемых пропан-бутановыми смесями (ПБС) СУГ от резервуарных установок [19].

Основными преимуществами систем автономных отопительных комплексов и автономной газификации являются:

1. Отпадает необходимость в постройке капитальных сооружений или привлечении дополнительных мощностей, что требует, не только времени, но и больших капитальных вложений. Надо всего лишь проложить коммуникации. Таким образом, первая причина - оперативность ввода объекта в эксплуатацию.

2. Капитальные решения энергоснабжения жёстко привязаны к определённому набору мощностей, тогда как системы автономного отопления и газоснабжения имеют возможность модернизироваться на любом этапе работ, включая стадию ввода в эксплуатацию. Это возможно потому, что данные системы имеют модульный характер построения. Поэтому конструктивная гибкость позволяет заказчикам не платить за избыточную мощность, оптимизируя затраты.

3. Пропан-бутан является экологически чистым видом топлива, которое даёт минимум вредных выбросов при сгорании. Это позволяет не только заботиться о природе, но и экономить на уплате налогов по экологии. Также важно знать, что в сжиженном углеводородном газе содержание сернистых соединений снижено, а это ощутимо продлевает срок службы оборудования. Так, у современных систем автономного газоснабжения,

работающих на СУГ, этот срок растягивается на более чем четверть века.

4. Автономность и независимость от внешних источников теплоснабжения гарантирует бесперебойное функционирование промышленно-бытового объекта. Это особенно актуально для предприятий непрерывного цикла, где важно поддерживать неизменные климатически условия (например, молочные и пищевые комбинаты, агропромышленные комплексы).

5. Стоимость одной единицы тепла, полученной при сжигании СУГ, ниже, чем при использовании для отопления, например, электричества или дизтоплива (жидкого).

Перспективная сфера для сжиженного углеводородного газа – автотранспорт. Дефицит дешевой и легкодобываемой нефти ежегодно увеличивается в связи с истощением нефтяных месторождений, острыми становятся вопросы загрязнения окружающей среды автомобильными выхлопами. Ситуация усугубляется увеличением количества автомобилей. Поэтому поиск альтернативных видов моторного топлива и перевод на него автотранспорт актуален как никогда.

Минимум вредных выбросов при сгорании и пониженное содержание сернистых соединений, что ощутимо продлевает срок службы двигателей автомобилей, позволит СУГ, который уже занимает определенное место среди активно используемых топлив, занять лидирующие позиции в России.

Стоимость СУГ, используемого в виде топлива для автомобилей уже сейчас намного ниже, чем стоимость жидких моторных топлив, и эта разница будет только расти в будущем.

Очевидные преимущества СУГ не остались незамеченными в высших органах государственной власти. Государственная программа по внедрению газомоторной техники, разработанная Правительством Российской Федерации в 2013 году, в соответствии с поручениями Президента Российской Федерации, предусматривает реализацию мер, которые позволят рас-

ширить использование сжиженного углеводородного газа в качестве моторного топлива и расширение сети автомобильных газозаправочных станций (АГЗС) [11].

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируются более 4 000 АГЗС, количество которых постоянно увеличивается [2].

Основным недостатком систем автономного газоснабжения СУГ, как и любого другого моторного топлива, пунктов заправки (АГЗС) является их взрывопожароопасность, что связано с наличием большого количества и специфическими свойствами пропанобутановых смесей, а также непосредственная близость, в частности, резервуаров для хранения СУГ под избыточным рабочим давлением в 1,6 МПа к объектам коммунально-бытового сектора [16].

По мере распространения и востребованности систем автономного газоснабжения и АГЗС строгое соблюдение норм пожарной безопасности подобных объектов выходит на новый профессиональный уровень. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 июля 2008 г №123-ФЗ [23] устанавливает основные требования пожарной безопасности к объектам защиты, находящимся вблизи резервуарных установок СУГ. Тем не менее, не смотря на соблюдение требований пожарной безопасности, в случае аварийных ситуаций, связанных с пожаром или взрывом, они представляют большую угрозу для жизни людей, оказавшихся в зоне воздействия опасных факторов. Известно немало случаев с возникновением аварий, пожаров и взрывов на резервуарных установках СУГ, АГЗС, которые сопровождались материальным ущербом и человеческие жертвы.

Примером подобной аварии может служить резонансный пожар, произошедший на АГЗС в г. Воронеже [12] (рис. 1).

В 12.17 23.04.2016 г. в ОДС ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Воронежской области» поступило сообщение о пожаре по



адресу: Левобережный р-он, ул. Лебедева д.8 Г. Произошло загорание цистерны с сжиженным газом. Пожар локализован в 14.00. Пожар ликвидирован в 15.21. Пожарные боролись с огнём более трех часов. В ликвидации ЧС было задействовано около 100 человек и 31 единица техники. Во время тушения пожара полицейские полностью перекрыли улицу Лебедева, в результате чего от города оказался отрезан целый район с населением примерно в 100 тысяч жителей. Движение на этом участке восстановили только к 16.00. В результате инцидента пострадали 2 человека, они получили серьёзные ожоги головы, кистей рук и ног. По результатам проверки было установлено, что пожар возник в результате утечки газа из автоцистерны.



Рис. 1. Тушение пожара на АГЗС г. Воронежа.

Более серьезных последствий пожара удалось избежать лишь благодаря быстрому прибытию пожарных расчетов на место и аварии, которые приступили к немедленному охлаждению горячей цистерны. Страшно представить, к каким бы последствиям привел взрыв цистерны, находящейся в непосредственной близости от автомобильной дороги общего назначения, мест массового скопления людей и мест плотной городской застройки.

В работе [4] описывается пожар на резервуарной установке с пропаном, в результате которого погибли 4 пожарных.

При прибытии пожарного караула по вызову на место пожара (загорание подсобного строения для хранения сена), оказалось, что рядом с ним расположена резервуарная установка емкостью 4 м<sup>3</sup> со сжиженным пропаном. Над резервуаром горел факел высотой 4,5 м. Несмотря на отчаянные попытки пожарных сбить пламя и охладить стенки резервуара, физического взрыва вследствие разрушения резервуара избежать не удалось. Куски конструкций разлетелись на расстояние до 200 м, и ими были смертельно ранены 4 пожарных. Несколько человек получили сильные ожоги и травмы, связанные с образованием огненного шара.

Обеспечить пожарную безопасность объектов, связанных с хранением СУГ в резервуарах под давлением, можно только при комплексном подходе и оценке пожарной опасности объекта защиты, способов ее снижения с учетом всех связанных с пожаром основных процессов, начиная со стадии нормальной эксплуатации до конечных результатов развивающегося или подавляемого пожара.

Одним из прогрессивных критериев оценки обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, является не превышение допустимых значений пожарного риска при выполнении необходимого комплекса мероприятий по обеспечению его пожарной безопасности [23].

Данный подход позволяет провести всеобъемлющий анализ пожарной опасности объекта защиты и исключить те требования пожарной безопасности, которые являются избыточными, и сделать акцент на требования пожарной безопасности, недооценка которых грозит реальной опасностью. Такой подход учитывает в достаточной степени как прогрессивные, способствующие непрерывному совершенствованию, производственные технологии в части снижения вероятности аварийных ситуаций,

так и методы и способы защиты объектов с целью исключения травмирования и гибели людей и уменьшения размера материального ущерба при возникновении возможных аварий.

В статье 64 [23] говорится, что если проводится расчет пожарного риска, то декларация пожарной безопасности, составленная в отношении объектов защиты, для которых законодательством Российской Федерации о градостроительной деятельности предусмотрено проведение экспертизы проектной документации (к ним в полной мере относятся АГЗС), должна предусматривать оценку пожарного риска.

Умение применять методику определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [13] позволит освоить последовательность анализа пожарной опасности хранения сжиженного углеводородного газа в резервуарах под избыточным давлением, определить частоту реализации пожароопасных ситуаций, спрогнозировать опасные факторы пожара и оценить их последствия для каждого из сценариев, сделать вывод о соответствии объекта защиты требуемому уровню пожарной безопасности.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Авария* – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемый пожар и (или) взрыв, и (или) выброс опасных веществ.

*Безопасная зона* – по [23] зона, в которой люди защищены от воздействия опасных факторов пожара или в которой опасные факторы пожара отсутствуют либо не превышают предельно допустимых значений.

*Взрыв* – по [23] быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов.

*Взрывоопасная смесь* – по [23] смесь воздуха или окислителя с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться.

*Взрывопожароопасность объекта защиты* – по [23] состояние объекта защиты, характеризующее возможностью возникновения взрыва и развития пожара или возникновения пожара и последующего взрыва.

*Газгольдер* – резервуар для хранения газообразных веществ: природный газ, биогаз, сжиженный углеводородный газ и т.д.

*Горючая среда* – по [23] среда, способная воспламениться при воздействии источника зажигания.

*Декларация пожарной безопасности* – по [23] форма оценки соответствия, содержащая информацию о мерах пожарной безопасности, направленных на обеспечение на объекте защиты нормативного значения пожарного риска.

*Допустимый пожарный риск* – по [23] пожарный риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических условий.

*Индивидуальный пожарный риск* – по [23] пожарный риск, который может привести к гибели человека в результате воздействия опасных факторов пожара.

*Источник зажигания* – по [23] средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения.

*Наружная установка* – по [23] комплекс аппаратов и технологического оборудования, расположенных вне зданий и сооружений.

*Объект защиты* – по [23] продукция, в том числе имущество граждан или юридических лиц, государственное или муниципальное имущество (включая объекты, расположенные на территориях поселений, а также здания, сооружения, транспортные средства, технологические установки, оборудование, агрегаты, изделия и иное имущество), к которой установлены или должны быть установлены требования пожарной безопасности для предотвращения пожара и защиты людей при пожаре.

*Огненный шар* – по ГОСТ Р 12.3.047 [9] крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

*Опасные факторы пожара (ОФП)* – по [23] факторы пожара, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу.

*Очаг пожара* – по [23] место первоначального возникновения пожара.

*Пожар* – по Федеральному закону «О пожарной безопасности» от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

*Пожар-вспышка* – сгорание облака предварительно перемешанной газопаровоздушной смеси без возникновения волн давления, опасных для людей и окружающих объектов.

*Пожарная безопасность объекта защиты* – состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара.

*Пожаровзрывоопасность веществ и материалов* - по [23] способность веществ и материалов к образованию горючей (пожароопасной или взрывоопасной) среды, характеризующаяся их физико-химическими свойствами и (или) поведением в условиях пожара;

*Пожарная опасность объекта защиты* – по [23] состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара.

*Пожарный риск* – по [23] мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей.

*Пожароопасная (взрывоопасная) зона* – по [23] часть замкнутого или открытого пространства, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие вещества и в котором они могут находиться при нормальном режиме технологического процесса или его нарушении (аварии).

*Пожароопасная ситуация* – по ГОСТ Р 12.3.047 [9] ситуация, характеризующаяся вероятностью возникновения пожара с возможностью дальнейшего его развития.

*Производственные объекты* – объекты промышленного и сельскохозяйственного назначения, в том числе склады, объекты инженерной и транспортной инфраструктуры (железнодорожного, автомобильного, речного, морского, воздушного и трубопроводного транспорта), объекты связи.

*Система противопожарной защиты* – по [23] комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на защиту людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и (или) ограничение последствий воздействия опасных факторов пожара на объект защиты (продукцию).

*Социальный пожарный риск* – по [23] степень опасности, ведущей к гибели группы 10 и более человек в результате воздействия опасных факторов пожара.

*Сценарий развития пожара* – по ГОСТ Р 12.3.047 [9] модель последовательности событий с определенной зоной воздействия опасных факторов на людей, здания, сооружения и технологические процессы.

*Технологическая среда* – по [23] вещества и материалы, обращающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе).

*Устойчивость объекта защиты при пожаре* – по [23] свойство объекта защиты сохранять конструктивную целостность и (или) функциональное назначение при воздействии опасных факторов пожара и вторичных проявлений опасных факторов пожара.

*Штиль* – затишье, безветренная или тихая погода со слабым ветром, скорость которого по шкале Бофорта не более 0,5 м/с.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Согласно статье 5 п.1 [23] Технического регламента о требованиях пожарной безопасности система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты в обязательном порядке должна содержать комплекс мероприятий, исключающих возможность превышения значений допустимого пожарного риска, установленного Федеральным законом от 22.07.2008г. № 123-ФЗ, и направленных на предотвращение опасности причинения вреда третьим лицам в результате пожара [23].

В Статье 6 п.1. [23] говорится, что пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной при выполнении одного из следующих условий:

1) в полном объеме выполнены требования пожарной безопасности, установленные техническими регламентами, принятыми в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», и пожарный риск не превышает допустимых значений, установленных настоящим Федеральным законом;

2) в полном объеме выполнены требования пожарной безопасности, установленные техническими регламентами, принятыми в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», и нормативными документами по пожарной безопасности.

В п. 6, 7 той же статьи [23] сказано, что расчет по оценке пожарного риска является составной частью декларации пожарной безопасности или декларации промышленной безопасности (на объектах, для которых они должны быть разработаны в соответствии с законодательством Российской Федерации).

Порядок проведения расчетов производственных объектов по оценке пожарного риска определяется нормативными правовыми актами Российской Федерации, основным из которых является Приказ МЧС России от 10.07.2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного



риска на производственных объектах» (с учетом изменений, внесенных приказом МЧС России № 649) [13].

В статье 93 [23] установлены нормативные значения для производственных объектов. Так, величина индивидуального пожарного риска в зданиях, сооружениях и на территориях производственных объектов не должна превышать одну миллионную в год.

Для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной миллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятитысячной в год. При этом должны быть предусмотрены меры по обучению персонала действиям при пожаре и по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска.

Величина индивидуального пожарного риска в результате воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, не должна превышать одну стомиллионную в год.

Для производственных объектов, на которых для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной стомиллионной в год и (или) величины социального пожарного риска одной десятиmillionной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной миллионной в год и (или) социального пожарного риска до одной сотысячной в год соответственно. При этом должны быть предусмотрены средства оповещения людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения, о пожаре на производственном объекте, а также до-

полнительные инженерно-технические и организационные мероприятия по обеспечению их пожарной безопасности и социальной защите.

Порядок проведения анализа пожарной опасности производственного объекта и расчета пожарного риска изложен в статьях 94-96 [23].

Оценка пожарного риска на производственном объекте должна предусматривать:

- 1) анализ пожарной опасности производственного объекта;
- 2) определение частоты реализации пожароопасных аварийных ситуаций на производственном объекте;
- 3) построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- 4) оценку последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития;
- 5) вычисление пожарного риска.

Анализ пожарной опасности производственных объектов должен предусматривать:

- 1) анализ пожарной опасности технологической среды и параметров технологических процессов на производственном объекте;
- 2) определение перечня пожароопасных аварийных ситуаций и параметров для каждого технологического процесса;
- 3) определение перечня причин, возникновение которых позволяет характеризовать ситуацию как пожароопасную, для каждого технологического процесса;
- 4) построение сценариев возникновения и развития пожаров, повлекших за собой гибель людей.

Для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций на производственном объекте используется информация:

- 1) об отказе оборудования, используемого на производственном объекте;

2) о параметрах надежности используемого на производственном объекте оборудования;

3) об ошибочных действиях персонала производственного объекта;

4) о гидрометеорологической обстановке в районе размещения производственного объекта;

5) о географических особенностях местности в районе размещения производственного объекта.

Оценка опасных факторов пожара, взрыва для различных сценариев их развития осуществляется на основе сопоставления информации о моделировании динамики опасных факторов пожара на территории производственного объекта и прилегающей к нему территории и информации о критических для жизни и здоровья людей значениях опасных факторов пожара или взрыва.

Оценка последствий воздействия опасных факторов пожара, взрыва на людей для различных сценариев развития пожароопасных ситуаций предусматривает определение условной вероятности поражения людей, попавших в зону поражения ОФП, взрыва.

В свою очередь, ГОСТ Р 12.3.047 - 2012 [9] определяет процедуру анализа пожарной опасности технологических процессов, включающую в себя:

- определение показателей пожарной опасности использующихся в технологическом процессе веществ и материалов;

- изучение технологического процесса с целью определения оборудования, участков или мест, где сосредоточены горючие материалы или возможно образование пыле- и парогазовоздушных горючих смесей;

- определение возможности образования горючей среды внутри помещений, аппаратов и трубопроводов;

- определение возможности образования в горючей среде источников зажигания;

- исследование различных вариантов аварий, путей распространения пожара и выбор проектной аварии;
- расчет категории помещений, зданий и наружных установок по взрывоопасной и пожарной опасности;
- определение состава систем предотвращения пожара и противопожарной защиты технологических процессов;
- разработку мероприятий по повышению пожарной безопасности технологических процессов и отдельных его участков.

В случае проведения расчета по оценке пожарного риска на объекте защиты проверяется:

- соответствие исходных данных, применяемых в расчете, фактическим данным, полученным в ходе его обследования;
- соответствие требованиям, установленным Правилами проведения расчетов по оценке пожарного риска на объекте защиты, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации № 272 [17].

Если расчет по оценке пожарного риска на объекте защиты соответствует предъявляемым требованиям и (или) выполнены меры, разработанные по результатам расчетов пожарных рисков, подтверждающих выполнение условий соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности, осуществляется проверка выполнения организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности по следующим направлениям:

1) наличие организационно-распорядительных документов по организации обучения мерам пожарной безопасности, проверки знаний требований пожарной безопасности в пределах компетенции работников;

2) готовность персонала организации к действиям в случае возникновения пожара;

3) правила поведения людей, порядок организации производства и (или) содержания территорий, зданий, сооружений, помещений организаций и других объектов;

4) создание и содержание подразделений пожарной охраны в соответствии с установленными нормами;

5) наличие лицензии у юридического лица или индивидуального предпринимателя, выполнявшего на объекте защиты работы, подлежащие лицензированию в области пожарной безопасности;

6) наличие у организаций, осуществляющих производство и (или) поставку либо реализацию продукции, подлежащей подтверждению соответствия требованиям пожарной безопасности, документа (сертификата или декларации соответствия) либо копии документа, заверенной в порядке, установленном законодательными и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации, подтверждающего соответствие этой продукции требованиям технических регламентов;

7) соответствие уведомления о начале деятельности виду деятельности по перечню, утвержденному Правительством Российской Федерации;

8) наличие у изготовителей (поставщиков), лиц, осуществляющих реализацию продукции, подлежащей подтверждению соответствия требованиям пожарной безопасности, в технической документации на вещества, материалы, изделия и оборудование сведений о показателях пожарной опасности и мерах пожарной безопасности при обращении с ними [1, 14, 17].

### **Контрольные вопросы к Введению, Основным понятиям и определениям, Общим сведениям**

1. Что такое СУГ?
2. Какие преимущества СУГ перед другими видами топлива?
3. Назовите области применения СУГ.
4. В чем недостаток объектов, связанных с хранением СУГ?

5. К чему может привести авария на объекте хранения СУГ?

6. По какому критерию можно считать, что объект защиты полностью соответствует требованиям пожарной безопасности?

7. Должна ли декларация пожарной безопасности, составленная в отношении объектов защиты, предусматривать оценку пожарного риска?

8. Усвоить знания в отношении применения информации раздела «Основные понятия и определения» для дальнейшего изучения материалов учебного пособия.

9. При каких условиях пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной?

10. В каком документе установлены нормативные значения пожарного риска для производственных объектов? Назовите их значение.

11. Что должна предусматривать оценка пожарного риска на производственном объекте?

12. Что должен предусматривать анализ пожарной опасности производственных объектов?

13. Какая информация используется для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций на производственном объекте?

14. Какой документ определяет процедуру анализа пожарной опасности технологических процессов и в чем она заключается?

15. Что проверяется на объекте защиты в случае проведения расчета по оценке пожарного риска?

16. По каким направлениям осуществляется проверка выполнения организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объекте защиты, если расчет по оценке пожарного риска соответствует предъявляемым требованиям?

## Глава 1. ТЕХНОЛОГИЯ ХРАНЕНИЯ СУГ

### 1.1. Технологическая схема автономной системы газоснабжения СУГ

Принципиальная технологическая схема приемки, хранения и подачи СУГ потребителю для организации автономной системы газоснабжения приведена на рис. 1.1.

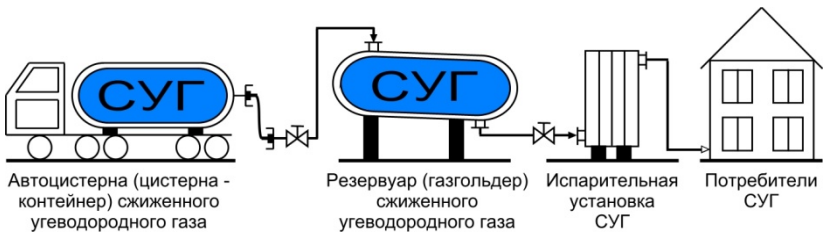


Рис. 1.1. Принципиальная технологическая схема автономной системы газоснабжения СУГ

В условиях автономной системы газоснабжения СУГ доставляется от завода – поставщика раздаточными автоцистернами, реке вагонами-цистернами или по магистральным трубопроводам в резервуары для хранения СУГ (газгольдеры). По мере необходимости СУГ из газгольдера направляется в испарительную установку для осуществления процесса регазификации с последующей подачей газовой фазы под заданным давлением потребителю (газопровод среднего давления  $\sim 0,1$  МПа). При использовании автономной системы в качестве резерва основному топливу (природному газу) и в том случае, когда газоиспользующие устройства изначально рассчитаны на природный газ, применяют смесительные установки перед подачей газа потребителю (на рис. 1.1. не показана) [22].

## 1.2. Технологическая схема автозаправочного комплекса СУГ

Технологическая схема автозаправочного комплекса СУГ с наземным размещением резервуара приведена на рис. 1.2.

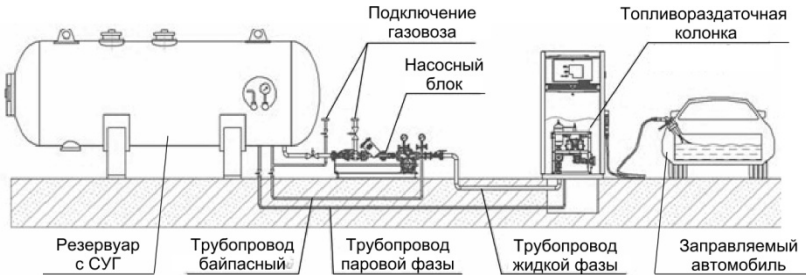


Рис. 1.2. Технологическая схема АГЗС с наземным размещением резервуаров

Основными функциями автозаправочного комплекса СУГ являются:

- заправка резервуаров;
- слив резервуаров;
- подача жидкой фазы СУГ на топливораздаточную колонку.

Поэтому необходимыми компонентами, входящими в состав автозаправочного комплекса, являются:

- блок хранения сжиженного газа СУГ;
- технологический блок;
- система сброса паров;
- система заправки автомобилей;
- системы автоматического контроля.

Заправка резервуаров, выдача сжиженного газа из топливораздаточных колонок, а также слив резервуаров осуществляются при помощи насосного агрегата.



В процессе выполнения технологических операций патрубки автоцистерны или колонки ТРК должны быть соответствующим образом подсоединены к патрубкам резервуара по жидкой и паровой фазе.

Прекращение работы насосного агрегата происходит после подачи сигнала датчиком уровня при заполнении или опорожнении резервуара.

Излишки сжиженного газа возвращаются в резервуар через байпасный клапан.

Предохранительные клапаны защищают резервуары от превышения давления в резервуарах.

Сбросные клапаны защищают от превышения давления в трубопроводах.

В технологическую схему может входить азотный блок (на рис. 1.2. не показан) для продувки трубопроводов и проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования.

### **1.3. Способы хранения СУГ**

В связи с уникальными свойствами пропан-бутановую смесь хранят следующими способами [6, 18, 26]:

1) под давлением при температуре не выше 323,15 К (50 °С) и при давлении насыщенных паров, соответствующем температурным условиям наружного воздуха;

2) изотермическим при постоянной температуре, обеспечивающей избыточное давление насыщенных паров в резервуаре, близкое к атмосферному давлению 4,9 - 6,8 кПа (0,005 - 0,007 кгс/см<sup>2</sup>) [15];

3) полуизотермическим, когда среда внутри резервуара соответствует изотермическим условиям хранения, а резервуар рассчитан на хранение при давлении.

В бытовом секторе широкое распространение получило хранение СУГ при температуре окружающей среды и повышенном давлении. Для этого применяют газгольдеры цилиндрической или сферической формы, устанавливаемые наземно или подземно, а также мобильные газгольдеры [16, 21, 24, 25].

Сферические резервуары СУГ по сравнению с цилиндрическими имеют более совершенную геометрическую форму. Сосуды такой формы требуют меньшего расхода металла на единицу объема емкости за счет уменьшения толщины стенки. Это возможно благодаря равномерному распределению напряжений по контуру всей оболочки и в сварных швах.

Несмотря на удобство эксплуатации сферических резервуаров, цилиндрические резервуары для СУГ с эллиптическими днищами получили широкое распространение и используются на всех видах хранилищ сжиженного углеводородного газа.

В зависимости от ориентации в пространстве резервуары для хранения СУГ могут быть вертикальными или горизонтальными. Горизонтальные газгольдеры имеют большую площадь испарения, но при этом ее значение меняется в зависимости от уровня заполнения емкости СУГ.

Основной характеристикой резервуара для хранения СУГ является его внутренний объем.

В большинстве случаев для автономной газификации удаленных объектов в средней полосе России применяются резервуары подземного размещения. Это обусловлено как климатическими условиями, так и повышенной безопасностью такого решения. Пример подземного размещения резервуара приведен на рис. 1.3.

Наряду с резервуарами подземного размещения СУГ, используются и наземные резервуары (рис. 1.4), что обусловлено следующими факторами:



Рис. 1.3. Подземное размещение резервуара (газгольдера) для хранения СУГ



Рис. 1.4. Исполнение наземных резервуаров (газгольдеров) для хранения СУГ

- не нужно проводить дорогостоящие земляные работы: достаточно просто подготовить фундамент;
- неподходящие геологические (вид грунта) и гидрогеологические условия;
- стесненные условия по размещению коммуникаций;
- при применении испарительных установок производительность линии подачи топлива потребителю не зависит от вида размещения резервуара.

Однако пожарная опасность при наземном размещении газгольдеров очевидно выше.

Резервуары под высоким давлением являются весьма взрывопожароопасными, поэтому к ним предъявляются повышенные требования по технике безопасности.

Одностенные или двустенные резервуары являются основным оборудованием при проектировании АГЗС. На них строится вся основная конфигурация технологических систем, которые могут быть распложены как на земле так под землей.

Штуцер отбора жидкой фазы наземной емкости для СУГ располагают внизу корпуса, в днище или обечайке, это позволяет держать насос для выдачи СУГ потребителю постоянно заполненным СУГ. Резервуары хранения сжиженного газа поставляются окрашенными белой или серебристой эмалью, с нанесенной красной полосой и надписью «Огнеопасно» (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Резервуар СУГ наземный одностенный

Подобными резервуарами оснащают полуприцепы газозовозов и автоцистерны, которые используются в передвижных автомобильных газозаправочных станциях (рис. 1.6 и 1.7).



Рис. 1.6. Полу-прицеп газозова



Рис. 1.7. Автоцистерна СУГ

Отличительной особенностью подземных газгольдеров (рис. 1.8) от наземных резервуаров для хранения СУГ является наличие гидроизоляции весьма усиленного типа - ВУТ по ГОСТ 9.602-2005 «Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии». Штуцера резервуара для газа, как правило, располагаются на горловине резервуара, редко на корпусе сосуда. Подземные резервуары СУГ имеют горловину высотой от 500 мм, т.к. заглубляются на глубину не менее 500 мм от верхней образующей обечайки.



Рис. 1.8. Резервуары подземные: одностенный (а) и двухстенный (б)

#### 1.4. Примеры практического применения систем автономного газоснабжения СУГ

В настоящее время смонтированы и успешно эксплуатируются системы автономного энергоснабжения СУГ на следующих промышленных предприятиях.

Аэрозольное производство изобутана и диметилэфира на предприятии ООО «Кримелте», расположенном в г. Жуковский Московской области (рис. 1.9.).



Рис. 1.9. Общий вид системы автономного энергоснабжения СУГ из двух резервуаров геометрическим объемом  $20 \text{ м}^3$  каждый

Нашли применение системы автономного газоснабжения сжиженными пропан-бутановыми смесями и в сельскохозяйственной отрасли, в цехах по переработке сельскохозяйственного сырья, например, на Великолукском свиноводческом комплексе (площадке репродукторе), расположенного южнее деревни Волчьей горы Невельского района Леховской волости Псковской области (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Общий вид системы автономного энергоснабжения СУГ из двух резервуаров геометрическим объемом  $12 \text{ м}^3$  каждый

СУГ находят применение в металлообрабатывающей, литейной, стекольной, автомобильной и пищевой промышленности. Смонтированы и успешно эксплуатируются системы автономного энергоснабжения СУГ на предприятиях.

Участок газовой сварки и резки для «Air Liquide» (ООО «АстронБилдингс»), г. Ярославль (рис. 1.11).

Стекловаренное производство ООО «ПД Татнефть Елабуга Стекловолокно» Елабужский район, территория промышленной площадки «Елабуга» (рис. 1.12)

На рис. 1.13. приведен пример автономного энергоснабжения СУГ коттеджного поселка или турбазы.



Рис. 1.11. Общий вид системы автономного энергоснабжения СУГ из двух резервуаров геометрическим объемом  $12 \text{ м}^3$  каждый



Рис. 1.12. Общий вид системы автономного энергоснабжения СУГ из двух резервуаров геометрическим объемом  $20 \text{ м}^3$  каждый



Рис. 1.13. Автономное энергоснабжение СУГ поселка или турбазы



### 1.5. Примеры практического применения АЗС с наличием газового моторного топлива

На рис. 1.19 и 1.20 приведены примеры практического применения АЗС с наличием газового моторного топлива.



Рис. 1.19. АГЗС г. Зеленоград, Восточно-коммунальная зона (ВКЗ), Фирсановское шоссе



Рис. 1.21. АГЗС г. Тамбов, Новоусманский район

Анализируя технологические схемы современных АЗС с наличием газового моторного топлива, можно сделать вывод, что на территории Российской Федерации наиболее востребованными являются АГЗС с наземным расположением резервуаров для хранения сжиженного углеводородного газа, как уже отмечалось следующими факторами:

- не нужно проводить дорогостоящие земляные работы, достаточно просто подготовить фундамент;
- простота монтажа и демонтажа при необходимости;
- неподходящие геологические (вид грунта) и гидрогеологические условия;
- стесненные условия по размещению коммуникаций (редко);
- минимальные финансовые затраты на ввод в эксплуатацию АГЗС.

Большинство эксплуатируемых резервуаров для хранения сжиженного углеводородного газа является одностенным, что объясняется их закупочной стоимостью, которая почти в два раза ниже по сравнению с аналогичными двустенными резервуарами.

Крайне популярны передвижные автомобильные газозаправочные станции, на которых резервуары для хранения СУГ установлены непосредственно на полуприцепы газовозов или автоцистерны, что объясняется практически отсутствием подготовительных работ для запуска и быстрым вводом в эксплуатацию подобных АЗС. Отпуск топлива при этом осуществляется непосредственно из топливораздаточной колонки, смонтированной в одном контейнере с резервуаром.

Очевидно, что многие АГЗС ориентированы на простое и быстрое извлечение прибыли от продажи сжиженного углеводородного газа потребителю, но при этом вопросы пожарной безопасности уходят на второй план.

## Контрольные вопросы к Главе 1

1. Опишите технологическую схему автономной системы газоснабжения СУГ.
2. Что такое регазификация?
3. Для чего используются смесительные установки?
4. Опишите технологическую схему автомобильной газо-заправочной станции.
5. Назовите основные функции автозаправочного комплекса СУГ.
6. Для чего в технологической схеме АГЗС нужен азотный блок?
7. Что является основным оборудованием при проектировании АГЗС?
8. Какими способами хранят СУГ? Какой вариант хранения получил распространение в бытовом секторе и на АГЗС?
9. Как классифицируются газгольдеры по форме и способу размещения относительно поверхности земли и т.д.? Назовите плюсы и минусы различных вариантов.
10. Где могут быть установлены резервуары для СУГ?
11. Где могут применяться автономные системы газоэнергоснабжения? Приведите примеры.
12. Приведите примеры действующих АГЗС вашего города, если таковые имеются.
13. Какие АГЗС: наземные или подземные, наиболее востребованы на территории Российской Федерации и почему?
14. В чем преимущества и недостатки большинства эксплуатируемых АГЗС?

## Глава 2. ОЦЕНКА ПОЖАРНОГО РИСКА ОБЪЕКТА ХРАНЕНИЯ СУГ

### 2.1. Анализ пожарной опасности технологической среды, физико-химические свойства СУГ

Основные физико-химические свойства компонентов сжиженных углеводородных газов и продуктов их сгорания [5, 7, 10]:

- *химическая формула* – пропан-бутан  $C_3H_8 + C_4H_{10}$  до 99%.
- *температура кипения (испарения)* при атмосферном давлении для пропана минус 42 °С, для бутана минус 0,5 °С.

Это означает, что при температуре газа выше указанных величин и атмосферном давлении происходит испарение жидкой фазы СУГ, а при температуре ниже данных величин происходит конденсация паров газа, т.е. СУГ является жидкостью. При более высоком давлении СУГ может оставаться жидкость при различных температурах окружающей среды. Так как пропан и бутан в чистом виде поставляются редко, то приведенные температуры не всегда соответствуют температуре кипения и конденсации применяемого газа. Применяемый в зимнее время газ обычно нормально испаряется при температуре окружающего воздуха до минус 20 °С. Если заводы-изготовители поставят газ с повышенным содержанием бутана, то конденсация паров газа может быть и в летнее время при небольших заморозках.

- *молярная масса*: для пропана – 44,1 г/моль, для бутана – 58,1 г/моль.

- *минимальная энергия зажигания* – 0,25 мДж.
- *максимальное давление взрыва* – 843 кПа.
- *температура горения* – 2271 °С.
- *температура самовоспламенения* при атмосферном давлении): для пропана – 470 С, для бутана – 405 С;

- *низшая теплота сгорания* (количество тепла, которое выделяется при сжигании  $1 \text{ м}^3$  паров газа): для пропана  $91 \text{ МДж/м}^3$ , для бутана  $119 \text{ МДж/м}^3$ .

- *диапазон распространения пламени*: пропана в смеси с воздухом 2,3-9,4 об.%, бутана в смеси с воздухом 1,5-8,5 об.%, смеси пропана и бутана с воздухом 1,5-9,5 об.%.  
 - *плотность паров СУГ* (смесь пропан-бутана) –  $2,35 \text{ кг/м}^3$ .

Пары СУГ значительно тяжелее воздуха (плотность воздуха  $1,29 \text{ кг/м}^3$ ) и собираются в нижней части помещений или в низинах на открытой местности, где может образоваться взрывоопасная газоздушная смесь при очень малых утечках газа. При затекании паров СУГ (в виде стелющегося тумана или прозрачного мерцающего облака) в не проветриваемые подвалы, устройства канализации, заглубленные помещения они могут оставаться там очень долго. Часто это происходит при утечках газа из подземных резервуаров и газопроводов. Особенно опасно то, что внешним осмотром такую утечку обнаружить нельзя, т.к. газ не всегда выходит на поверхность земли, а распространяясь под землей может попадать в канализацию или подвалы на большом удалении от места утечки. Жидкая фаза СУГ легко проникает сквозь почву.

- *плотность жидкой фазы СУГ* –  $550 \text{ кг/ м}^3$ ;

- *коэффициент объемного расширения жидкой фазы СУГ* – в 16 раз больше, чем у воды. При повышении температуры газа его объём значительно увеличивается, что может привести к разрушению (разрыву) стенок сосуда с газом.

- для *полного сгорания* паров СУГ необходимо:

на  $1 \text{ м}^3$  паров пропана –  $24 \text{ м}^3$  воздуха или  $5,0 \text{ м}^3$  кислорода,

на  $1 \text{ м}^3$  паров бутана –  $31 \text{ м}^3$  воздуха или  $6,5 \text{ м}^3$  кислорода.

- *объем паров газа* с 1 кг пропана -  $0,51 \text{ м}^3$ , с 1 л пропана -  $0,269 \text{ м}^3$ , с 1 кг бутана -  $0,386 \text{ м}^3$ , с 1 л бутана -  $0,235 \text{ м}^3$ .

- *нормальная скорость распространения пламени* горящего пропана -  $0,39 \text{ м/с}$ , бутана -  $0,45 \text{ м/с}$ .

СУГ бесцветны (невидимы) и большей частью не имеют сильного собственного запаха, поэтому их сложно обнаружить. В случае их утечки может образоваться взрывоопасная газоздушная смесь. По степени воздействия на организм газы относятся к веществам 4-го класса опасности по [ГОСТ 12.1.007]. Для того, чтобы своевременно обнаружить утечки газа, горючие газы подвергают одоризации, т. е. придают им резкий специфический запах.

## **2.2. Анализ пожарной опасности параметров технологического процесса хранения СУГ**

Факторы, способствующие возникновению и развитию аварий при хранении СУГ [6, 8, 19, 21, 27]:

1. Наличие на объекте большого количества СУГ создает опасность аварийного выбросов опасного вещества при аварийной разгерметизации резервуара, образованию газоздушных смесей (ГВС) с кислородом воздуха, а при наличии источников зажигания – к взрыву или горению облака ГВС, факельному горению, пожару проливов, образованию огненного шара.

Причиной аварии могут служить отказы трубопроводов, арматуры, разъемных соединений, разгерметизация резервуаров из-за ошибок при проектировании и эксплуатации, дефектов изготовления, механических повреждений, коррозии, нагрева, размораживания и т.п.

2. Хранение СУГ под давлением создает дополнительную опасность увеличения масштабов распределения осколков в пространстве при взрыве.

Причиной аварии могут служить отказы компрессорного и насосного оборудования из-за низкого уровня надежности отдельных узлов (торцевых уплотнений, подшипниковых узлов), гидроударов, повышенных вибрационных нагрузок и т.п.

### **2.3. Возможные источники зажигания на объекте хранения СУГ в резервуарах**

Источниками воспламенения могут являться [6, 18, 26]:

- применение открытого огня при осмотрах оборудования;
- использование негерметичных осветительных приборов и арматуры;
- нарушение правил проведения зачистных работ в резервуарах;
- не выполнение требований по защите от проявлений статического электричества;
- электростатические разряды при операциях слива/налива газа пропана-бутана в результате несоблюдения правил пожарной безопасности;
- возгорание пиррофорных отложений;
- неисправность электрооборудования;
- разряды атмосферного электричества;
- нарушение техники безопасности при проведении ремонтных и сварочных работ;
- курение вблизи резервуара для хранения СУГ;
- использование оборудования, выполненного из искрящих материалов;
- диверсия третьих лиц.

### **2.4. Расчет индивидуального пожарного риска объекта хранения СУГ в резервуарах под давлением**

Условная схема расчета индивидуального пожарного риска для человека (работника или частного лица), находящегося на открытой площадке или в здании вблизи наземного одностенного или двустенного резервуара для хранения СУГ под давлением в заданном населенном пункте представлена на рис. 2.1.

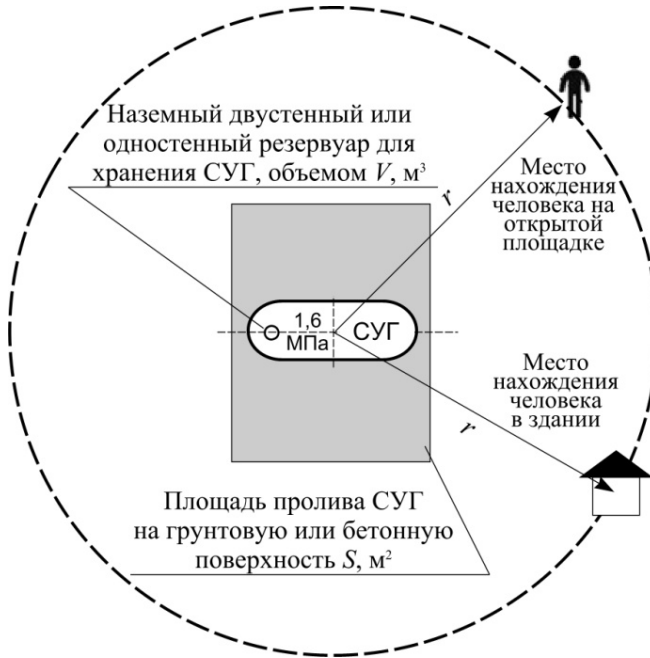


Рис. 2.1. Условная схема расчета индивидуального пожарного риска для человека, находящегося вблизи резервуара для хранения СУГ под давлением:  $V$  – рабочий объем резервуара под давлением,  $\text{м}^3$ ;  $r$  – расстояние от резервуара до человека, находящегося на открытой площадке или в здании, м;  $S$  – площадь пролива СУГ на грунтовую или бетонную поверхность,  $\text{м}^2$ .

#### 2.4.1. Исходные данные для расчета индивидуального пожарного риска

В качестве примера для расчета рассмотрим АГЗС, на территории, которой находится наземный одностенный резервуар для хранения СУГ объемом  $20 \text{ м}^3$ , работающий под избыточным давлением  $1,6 \text{ МПа}$ , из которого происходит выдача топлива потребителю через топливораздаточную колонку. Производственный объект находится в г. Воронеже.



Определим индивидуальный пожарный риск для работника АГЗС, который может находиться как на открытой площадке, так и в здании дополнительного сервисного обслуживания клиентов на территории заправочной станции на расстоянии 20 м от резервуара для хранения СУГ. Время нахождения работника в разных областях территории объекта считать равномерно распределенным в течение его рабочей смены, которая составляет 8 часов при 5 дневной рабочей недели.

При оценке пожарной опасности промышленных объектов вероятность образования горючей среды и появления источника зажигания условно принимаем равной единице. При этом в качестве расчетного выбираем наиболее неблагоприятный вариант аварии или период нормальной работы технологического оборудования (аппарата), при котором в пожаре (взрыве) участвует наибольшее количество веществ и материалов, наиболее опасных в отношении последствий пожара (взрыва), т. е. так называемый принцип «максимальной проектной аварии» [3, 5, 13].

Учитывая принцип «максимальной проектной аварии» в качестве расчетного вещества, хранящегося в резервуаре под давлением, принимаем наиболее опасный из рассматриваемых углеводородных газов – пропан. Температуру окружающего воздуха принимаем равной средней максимальной температуре для данного региона (для г. Воронежа – 41 С [20]).

#### **2.4.2. Иницирующие пожароопасные ситуации события для наземного одностенного резервуара СУГ**

Для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций могут использоваться статистические данные по аварийности или расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике рассматриваемого объекта.

Информация о частотах реализации пожароопасных ситуаций (в том числе возникших в результате ошибок работника), необходимая для оценки риска, может быть получена непосредственно из данных о функционировании исследуемого объекта или из данных о функционировании других подобных объектов [27, 28].

В качестве инициирующих пожароопасные ситуации событий используем рекомендуемые сведения для резервуара под давлением из табл. П1.1 [13] и рассмотрим:

- локальную разгерметизацию резервуара с диаметром отверстия истечения 5 мм;
- локальную разгерметизацию резервуара с диаметром отверстия истечения 12,5 мм;
- локальную разгерметизацию резервуара с диаметром отверстия истечения 25 мм;
- локальную разгерметизацию резервуара с диаметром отверстия истечения 50 мм;
- локальную разгерметизацию резервуара с диаметром отверстия истечения 100 мм;
- полное разрушение резервуара;
- внешнее воздействие опасных факторов пожара на резервуар, приводящее к его взрыву с образованием огненного шара.

### **2.4.3. Построение логических деревьев событий при разгерметизации резервуара СУГ**

Построение логического дерева событий позволяет определить развитие возможных пожароопасных ситуаций и пожаров, возникающих вследствие реализации инициирующих пожароопасную ситуацию событий. Анализ дерева событий представляет собой «осмысливаемый вперед» процесс, то есть процесс, при котором исследование развития пожароопасной си-

туации начинается с исходного события с рассмотрением цепи последующих событий, приводящих к возникновению пожара.

При построении логических деревьев событий учитываются следующие положения:

- выбирается пожароопасная ситуация, которая может повлечь за собой возникновение аварии с пожаром с дальнейшим его развитием;

- развитие пожароопасной ситуации и пожара должно рассматриваться постадийно с учетом места ее возникновения на объекте оценки риска, уровня потенциальной опасности каждой стадии и возможности ее локализации и ликвидации;

- переход с рассматриваемой стадии на новую определяется возможностью либо локализации пожароопасной ситуации или пожара на рассматриваемой стадии, либо развития пожара, связанного с вовлечением расположенных рядом технологического оборудования, помещений, зданий и т.п. в результате влияния на них опасных факторов пожара, возникших на рассматриваемой стадии. Условные вероятности переходов пожароопасной ситуации или пожара со стадии на стадию одной ветви или с ветви на ветвь определяются, исходя из свойств, вовлеченных в пожароопасную ситуацию или пожар горючих веществ (физико-химические и пожароопасные свойства, параметры, при которых вещества обращаются в технологическом процессе и т.д.), условной вероятности реализации различных метеорологических условий (температура окружающей среды, скорость и направление ветра и т.д.), наличия и условной вероятности эффективного срабатывания систем противоаварийной и противопожарной защиты, величин зон поражения опасными факторами пожара, объемно-планировочных решений и конструктивных особенностей оборудования и зданий производственного объекта.

При разгерметизации резервуара происходит истечение СУГ с его разливом. Предположим, что испарение СУГ с поверхности пролива при неподвижной воздушной среде (скорость ветра менее 0,5 м/с) приводит к образованию взрывоопасной зоны (часть открытого пространства, в пределах которого концентрация взрывоопасной смеси превышает НКПР). А в случае наличия ветра принимаем, что облака газа быстро рассеивались, не достигая НКПР.

Результатом аварии может стать факельное горение СУГ; сгорание газовоздушного облака с образованием волны избыточного давления или пожара-вспышки при безветренной погоде; пожар пролива; образование огненного шара при полном разрушении резервуара и воздействии ОФП на него.

Логические деревья событий с указанием номеров сценариев возникновения и развития пожароопасных ситуаций представлены на рис. 2.2 [5, 28].

Наличие «черты» над условной вероятностью обозначает противоположное событие:

$$\bar{Q} = 1 - Q. \quad (8.1)$$

Описание сценариев возникновения и развития пожароопасных ситуаций.

Сценарии 1, 6, 11, 16, 21, 26 - локальная (полная) разгерметизация резервуара; мгновенное воспламенение СУГ, выходящего из образовавшегося отверстия; факельное горение п.29 [13] или огненный шар и пожар пролива при полном разрушении.

Сценарии 2, 7, 12, 17, 22, 27 - локальная (полная) разгерметизация резервуара; мгновенное воспламенение СУГ, выходящего из образовавшегося отверстия, не произошло; пролив СУГ; образование взрывоопасной зоны и ее сгорание с образованием волны избыточного давления и пожар пролива.

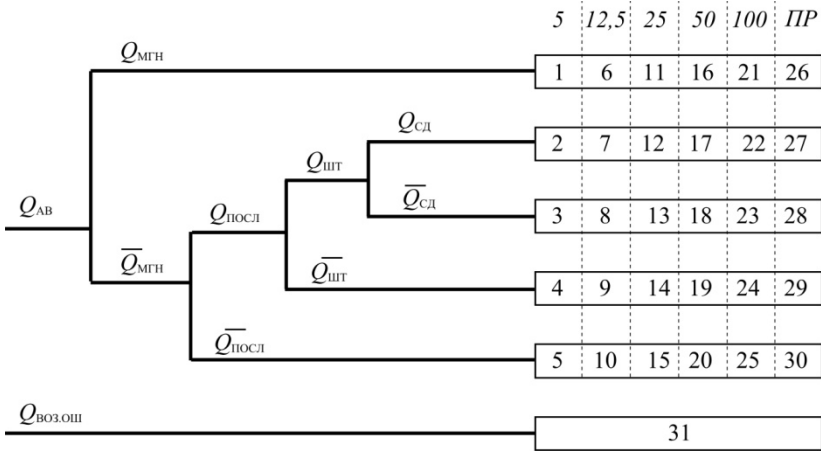


Рис. 2.2 Логические деревья событий с указанием номеров сценариев возникновения и развития пожароопасных ситуаций при разгерметизации резервуара СУГ

(номера и описание сценариев приведены ниже):

$Q_{\text{AB}}$  - частота разгерметизации резервуара с последующим выходом СУГ;  $Q_{\text{МГН}}$  - условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ;  $Q_{\text{посл}}$  - условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения;  $Q_{\text{шт}}$  - максимальная повторяемость штиля на территории расположения объекта;  $Q_{\text{сд}}$  - условная вероятность сгорания облака с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения;  $Q_{\text{воз.ош}}$  - частота внешнего воздействия опасных факторов пожара, приводящего к реализации огненного шара;  $\bar{Q}$  - условная вероятность обратного события; 5, 12,5, 25, 50, 100 – сценарии, связанные с аварией резервуара с образованием отверстий истечения 5 мм, 12,5 мм, 25 мм, 50 мм, 100 мм соответственно; ПР – сценарии, связанные с аварией резервуара и его полным разрушением.

Сценарии 3, 8, 13, 18, 23, 28 - локальная (полная) разгерметизация резервуара; мгновенное воспламенение СУГ, выходящего из образовавшегося отверстия, не произошло; пролив СУГ; образование взрывоопасной зоны и ее сгорание с образованием пожара-вспышки и пожар пролива.

Сценарии 4, 9, 14, 19, 24, 29 - локальная (полная) разгерметизация резервуара; мгновенное воспламенение СУГ, выходящего из образовавшегося отверстия, не произошло; пролив СУГ; образование взрывоопасной зоны не произошло; пожар пролива.

Сценарии 5, 10, 15, 20, 25, 30 - локальная (полная) разгерметизация резервуара; мгновенное воспламенение СУГ, выходящего из образовавшегося отверстия, не произошло; пролив СУГ; последующего воспламенения СУГ не произошло; без последствий.

Сценарий 31 – воздействие внешних ОФП; образование огненного шара.

Сценарии 5, 10, 15, 20, 25, 30 не представляют угрозы для жизни и здоровья человека, поэтому в дальнейших расчетах не учитывались.

#### **2.4.4. Последовательность расчета частот реализации сценариев пожароопасных ситуаций при разгерметизации резервуара с СУГ**

Максимальный массовый расход СУГ в случае локальной разгерметизации резервуара под давлением определяем по формуле (ПЗ.15 [13]):

- для истечения паровой фазы:

$$q_V = \mu f_{отв} \sqrt{\left(\frac{P_C M}{RT_C}\right) P_C (0,167 P_R^5 + 0,534 P_R^{1,95})}, \quad (2.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент истечения газа, допускается принимать равным 0,8 [12];

$f_{отв} = \pi d_{отв}^2 / 4$  - площадь отверстия, через которое СУГ выходит из резервуара;

$P_C$  – критическое давление сжиженного газа, для пропана 4,2 МПа;

$M$  – молярная масса, для пропана 0,0441 кг/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(К×моль);

$T_C$  – критическая температура СУГ, для пропана 369,8 К;

$P_V$  – давление СУГ в резервуаре, 1,6 МПа;

$P_R = P_V/P_C = 1,6/4,21 = 0,38$  – безразмерное давление СУГа в резервуаре.

- для истечения жидкой фазы:

$$q_L = q_V \sqrt{\frac{(\rho_L/\rho_V)P_R}{(1,22T_R^{1,5})}}, \quad (2.2)$$

где  $\rho_L$  – плотность жидкой фазы, для пропана при 41 °С – 464 кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_V$  – плотность паровой фазы, для пропана при 41 °С – 1,72 кг/м<sup>3</sup>;

$T$  – температура СУГ в резервуаре (принимаем равной температуре воздуха, 313,5 К);

$T_R = T/T_C = 313,5/369,8 = 0,85$  – безразмерное давление сжиженного газа в резервуаре.

Результаты расчета площади отверстия истечения, скорости истечения паровой и жидкой фазы и максимального массового расхода истечения СУГ в случае образования отверстий диаметрами 5, 12,5, 25, 50 и 100 мм в корпусе резервуара представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Площадь отверстия истечения, скорость истечения паровой и жидкой фазы и максимальный массовый расход истечения СУГ в зависимости от образовавшегося отверстия в резервуаре

$d_{\text{отв}}, \text{ м}$	$f_{\text{отв}}, \text{ м}^2$	$q_V, \text{ кг/с}$	$q_L, \text{ кг/с}$
0,0050	$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,08	0,77
0,0125	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,46	4,42
0,0250	$4,9 \cdot 10^{-4}$	1,88	18,05
0,0500	$19,6 \cdot 10^{-4}$	7,54	72,38
0,1000	$78,5 \cdot 10^{-4}$	30,19	289,8

Частоты реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для резервуара с СУГ определяем по табл. П1.1 [13], принимая во внимание, что частоту реализации сценариев, связанных огненного шара на емкостном оборудовании со сжиженными газами вследствие внешнего воздействия очага пожара при отсутствии необходимых данных допускается принимать равной  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$  на один резервуар. Далее по табл. П2.1 [13] находим условные вероятности мгновенного воспламенения, воспламенения с задержкой и сгорания облака газозвоздушной смеси с образованием волны избыточного давления взрыва, выбирая диапазон массового расхода истечения в зависимости от расхода, представленного в табл. 2.1. Согласно [5, 9] для СУГ используем условные вероятности воспламенения как для двухфазной среды.

Выбранные данные представлены в табл. 2.2.

Значение частоты реализации каждого сценария определяем как произведение частоты инициирующего аварии события и условных вероятностей развития аварийной ситуации по конкретному сценарию.

Например, значение частоты реализации сценария 2 вычисляем по формуле:

$$Q_2 = Q_{ав5} \bar{Q}_{мгн5} Q_{посл5} Q_{шт} Q_{сд5}, \quad (2.3)$$

где «5» - индекс, обозначающий, что используемая частота и условные вероятности относятся к локальной разгерметизации резервуара СУГ с диаметром отверстия истечения равным 5 мм. Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж согласно [20] составляет  $Q_{шт} = 0,14$ . По аналогии получим

$$Q_1 = Q_{ав5} Q_{мгн5} = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,005 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_2 = Q_{ав5} \bar{Q}_{мгн5} Q_{посл5} Q_{шт} Q_{сд5} = \\ = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,005) \cdot 0,005 \cdot 0,14 \cdot 0,08 = 0,02 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_3 = Q_{ав5} \bar{Q}_{мгн5} Q_{посл5} Q_{шт} \bar{Q}_{сд5} = \\ = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,005) \cdot 0,005 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,08) = 0,26 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$



Таблица 2.2

Обозначения, определения и значения частот реализации, инициирующих пожароопасные ситуации событий и условных вероятностей мгновенного воспламенения, воспламенения с задержкой и сгорания газоздушного облака с образованием избыточного давления при разгерметизации резервуара с СУГ

Обозначение	Определение	Значение
<i>Локальная разгерметизация резервуара (диаметр отверстия истечения 5 мм). Сценарии 1-5</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	4,0·10 <sup>-5</sup>
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,005
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,005
$Q_{шт}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup> [20]	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,080
<i>Локальная разгерметизация резервуара (диаметр отверстия истечения 12,5 мм). Сценарии 6-10</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,035
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,036
$Q_{шт}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup>	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,240

<i>Локальная разгерметизация резервуара (диаметр отверстия истечения 25 мм). Сценарии 11-15</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	$6,2 \cdot 10^{-6}$
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,035
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,036
$Q_{шт}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup>	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,240
<i>Локальная разгерметизация резервуара (диаметр отверстия истечения 50 мм). Сценарии 15-20</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	$3,8 \cdot 10^{-6}$
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,150
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,176
$Q_{шт}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup>	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,600

<i>Локальная разгерметизация резервуара (диаметр отверстия истечения 100 мм). Сценарии 21-25</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	$1,7 \cdot 10^{-6}$
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,150
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,176
$Q_{ит}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup>	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,600
<i>Полное разрушение резервуара. Сценарии 26-30</i>		
$Q_{ав}$	Частота разгерметизации с последующим проливом СУГ, год <sup>-1</sup>	$3,0 \cdot 10^{-7}$
$Q_{мгн}$	Условная вероятность мгновенного воспламенения СУГ, год <sup>-1</sup>	0,200
$Q_{посл}$	Условная вероятность последующего воспламенения СУГ при отсутствии мгновенного воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,240
$Q_{ит}$	Максимальная повторяемость штиля на территории г. Воронеж, год <sup>-1</sup>	0,14
$Q_{сд}$	Условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании взрывоопасной зоны и ее последующего воспламенения, год <sup>-1</sup>	0,600
<i>Образование огненного шара Сценарий 31</i>		
$Q_{воз.ош}$	Частота внешнего воздействия ОФП, приводящего к реализации огненного шара, год <sup>-1</sup>	$2,5 \cdot 10^{-5}$

$$Q_4 = Q_{a65} \bar{Q}_{мгн5} Q_{посл5} \bar{Q}_{ит} =$$

$$= 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,005) \cdot 0,005 \cdot (1 - 0,14) = 1,71 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$Q_5$  – не учитываем;

$$Q_6 = Q_{a612,5} Q_{мгн12,5} = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,035 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_7 = Q_{a612,5} \bar{Q}_{мгн12,5} Q_{посл12,5} Q_{ит} Q_{сд12,5} =$$

$$= 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,036 \cdot 0,14 \cdot 0,24 = 0,12 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_8 = Q_{a612,5} \bar{Q}_{мгн12,5} Q_{посл12,5} Q_{ит} \bar{Q}_{сд5} =$$

$$= 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,036 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,24) =$$

$$= 0,37 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_9 = Q_{a65} \bar{Q}_{мгн5} Q_{посл5} \bar{Q}_{ит} =$$

$$= 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,036 \cdot (1 - 0,14) = 2,64 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$Q_{10}$  – не учитывается;

$$Q_{11} = Q_{a625} Q_{мгн25} = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,035 = 2,17 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{12} = Q_{a625} \bar{Q}_{мгн25} Q_{посл25} Q_{ит} Q_{сд25} =$$

$$= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,03 \cdot 0,14 \cdot 0,24 = 0,07 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{13} = Q_{a625} \bar{Q}_{мгн25} Q_{посл25} Q_{ит} \bar{Q}_{сд25} =$$

$$= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,036 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,24) = 0,23 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{14} = Q_{a625} \bar{Q}_{мгн25} Q_{посл25} \bar{Q}_{ит} =$$

$$= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,035) \cdot 0,036 \cdot (1 - 0,14) = 1,85 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$Q_{15}$  – не учитывается;

$$Q_{16} = Q_{a650} Q_{мгн50} = 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15 = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{17} = Q_{a650} \bar{Q}_{мгн50} Q_{посл50} Q_{ит} Q_{сд50} =$$

$$= 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot 0,14 \cdot 0,6 = 0,48 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{18} = Q_{a650} \bar{Q}_{мгн50} Q_{посл50} Q_{ит} \bar{Q}_{сд50} =$$

$$= 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,6) = 0,32 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$$Q_{19} = Q_{a650} \bar{Q}_{мгн50} Q_{посл50} \bar{Q}_{ит} =$$

$$= 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,14) = 4,89 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1};$$

$Q_{20}$  – не учитывается;

$$\begin{aligned}
 Q_{21} &= Q_{ав100} Q_{мгн100} = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15 = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{22} &= Q_{ав100} \bar{Q}_{мгн100} Q_{посл100} Q_{шт} Q_{сд100} = \\
 &= 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot 0,14 \cdot 0,6 = 0,21 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{23} &= Q_{ав100} \bar{Q}_{мгн100} Q_{посл100} Q_{шт} \bar{Q}_{сд100} = \\
 &= 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,6) = 0,14 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{24} &= Q_{ав100} \bar{Q}_{мгн100} Q_{посл100} \bar{Q}_{шт} = \\
 &= 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,14) = 2,19 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{25} & - \text{ не учитывается}; \\
 \\
 Q_{26} &= Q_{авПР} Q_{мгнПР} = 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{27} &= Q_{авПР} \bar{Q}_{мгнПР} Q_{послПР} Q_{шт} Q_{сдПР} = \\
 &= 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,24 \cdot 0,14 \cdot 0,6 = 1,05 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{28} &= Q_{авПР} \bar{Q}_{мгнПР} Q_{послПР} Q_{шт} \bar{Q}_{сдПР} = \\
 &= 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,24 \cdot 0,14 \cdot (1 - 0,6) = 0,03 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{29} &= Q_{авПР} \bar{Q}_{мгнПР} Q_{послПР} \bar{Q}_{шт} = \\
 &= 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,24 \cdot (1 - 0,14) = 0,50 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}; \\
 Q_{30} & - \text{ не учитывается}; \\
 \\
 Q_{31} &= 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Полученные частоты реализации сценариев сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Частоты реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций для резервуара с СУГ

№ сценария, $j$	Частота реализации $j$ -го сценария, $\text{год}^{-1}$	№ сценария, $j$	Частота реализации $j$ -го сценария, $\text{год}^{-1}$
1	$2 \cdot 10^{-7}$	16	$5,7 \cdot 10^{-7}$
2	$0,02 \cdot 10^{-7}$	17	$0,48 \cdot 10^{-7}$
3	$0,26 \cdot 10^{-7}$	18	$0,32 \cdot 10^{-7}$
4	$1,71 \cdot 10^{-7}$	19	$4,89 \cdot 10^{-7}$
5	<i>не учитывается</i>	20	<i>не учитывается</i>
6	$3,5 \cdot 10^{-7}$	21	$2,6 \cdot 10^{-7}$

7	$0,12 \cdot 10^{-7}$	22	$0,21 \cdot 10^{-7}$
8	$0,37 \cdot 10^{-7}$	23	$0,14 \cdot 10^{-7}$
9	$2,64 \cdot 10^{-7}$	24	$2,19 \cdot 10^{-7}$
10	<i>не учитывается</i>	25	<i>не учитывается</i>
11	$2,17 \cdot 10^{-7}$	26	$0,6 \cdot 10^{-7}$
12	$0,07 \cdot 10^{-7}$	27	$1,05 \cdot 10^{-7}$
13	$0,23 \cdot 10^{-7}$	28	$0,03 \cdot 10^{-7}$
14	$1,85 \cdot 10^{-7}$	29	$0,50 \cdot 10^{-7}$
15	<i>не учитывается</i>	30	<i>не учитывается</i>
		31	$250 \cdot 10^{-7}$

## 2.4.5. Опасные факторы пожара для различных сценариев развития пожароопасных ситуаций

### 2.4.5.1. Масса СУГ, испарившегося с поверхности пролива

Принимаем, что разгерметизация приводит к истечению всего содержимого из резервуара с СУГ с образованием пролива.

При выбросе СУГ из оборудования, в котором жидкость находится под давлением, часть продукта за счет внутренней энергии мгновенно испаряется, образуя с капельками жидкости облако аэрозоля. Массовая доля мгновенно испарившейся жидкости определяется по формуле И.2 приложение И [9]:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p(T_a - T_g)}{L_g}\right), \quad (2.4)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость СУГ, для пропана при 41 °С –  $2,851 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);

$T_a$  – температура окружающего воздуха 313,5 К;

$T_g$  – температура кипения СУГ при атмосферном давлении, для пропана 231 К;

$L_g$  – удельная теплота парообразования СУГ,  $484,5 \cdot 10^3$  Дж/кг [4].

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{2,851 \cdot 10^3 (313,5 - 231)}{484,5 \cdot 10^3}\right) = 0,385.$$

Площадь пролива при растекании на неограниченной поверхности определяем по формуле:

$$F_{\Pi} = \delta f_p V_H 0,8 \quad (2.5)$$

где  $f_p$  - коэффициент разлития при проливе, принимаем согласно (ПЗ.27) [3],  $f_p = 20 \text{ м}^{-1}$  - при проливе на спланированное грунтовое покрытие (примем это в качестве допущения) (для справки при проливе на бетонное или асфальтное покрытие;  $f_p = 150 \text{ м}^{-1}$ , при отсутствии данных  $f_p = 5 \text{ м}^{-1}$ ),  $V_H$  - объем резервуара,  $\text{м}^3$ , 0,8 - коэффициент заполнения резервуара.

$$F_{\Pi} = (1 - 0,385) \cdot 20 \cdot 20 \cdot 0,8 = 197 \text{ м}^2$$

При  $\delta > 0,35$  вся масса СУГ, находящейся в резервуаре под давлением, за счет взрывного характера испарения переходит в парокapпельное облако (при  $\delta < 0,35$  необходимо использовать методику, изложенную в приложения И [9]). Данное допущение говорит о том, что пролив не образуется совсем. Однако в данном случае мы рассматриваем пролив, как одно из возможных последствий аварии резервуара. Тогда, масса испарившегося газа

$$m_{\Gamma} = \rho_L V_H 0,8 \quad (2.6)$$

$$m_{\Gamma} = 464 \cdot 20 \cdot 0,8 = 7424 \text{ кг}$$

( $\rho_L$  - плотность жидкой фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , из раздела 2.4.4)

#### 2.4.5.2. Прогнозирование радиуса взрывоопасной зоны

Выход СУГ из резервуара в открытое пространство при отсутствии мгновенного воспламенения и неподвижной воздушной среде сопровождается образованием взрывоопасной зоны. Расчетное определение размеров зоны, ограниченной НКПР, производим в соответствии с методом, приведенным в [3, 5, 13].

Радиус зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих НКПР, в случае разгерметизации резервуара равен:

$$R_{\text{нкпр}} = 7,8 \left( \frac{m_g}{\rho_g C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,33}, \quad (2.7)$$

$\rho_g$  – плотность газа при расчетной температуре и атмосферном давлении, 1,72 кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{нкпр}}$  – нижний концентрационный предел распространения пламени, для пропана 2,3 % об.

$$R_{\text{нкпр}} = 7,8 \left( \frac{7424}{1,72 \cdot 2,3} \right)^{0,33} = 94 \text{ м.}$$

### 2.4.5.3. Прогнозирование радиуса зоны поражения при пожаре-вспышке

В случае образования парогазовоздушной смеси в незагромождённом технологическом оборудовании пространстве и его зажигании относительно слабым источником (например, искрой) сгорание этой смеси происходит, как правило, с небольшими видимыми скоростями пламени. При этом амплитуды волны сжатия малы и могут не приниматься во внимание при оценке поражающего воздействия. В этом случае реализуется так называемый пожар-вспышка, при котором зона поражения высокотемпературными продуктами сгорания парогазовоздушной смеси практически совпадает с максимальным размером облака продуктов сгорания (т. е. поражаются в основном объекты, попадающие в это облако) [13].

Радиус зоны поражения людей высокотемпературными продуктами сгорания газовой смеси в случае реализации пожара-вспышки будет равен:

$$R_F = 1,2 \cdot R_{\text{НКПР}} \quad (2.8)$$

$$R_F = 1,2 \cdot 94 = 112,8 \text{ м}$$



#### 2.4.5.4. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления в свободном пространстве

При контакте горючей газозвушной смеси с источником зажигания возможно ее быстрое сгорание с образованием волны давления (ударной волны), воздействие которой может привести к гибели людей или разрушению соседнего оборудования, сооружений и зданий.

Исходные данные для проведения расчета (для пропана):

- число атомов углерода в молекуле горючего,  $n_c = 3$ ;
- число атомов водорода в молекуле горючего,  $n_H = 8$ ;
- число атомов галоидов в молекуле горючего,  $n_x = 0$ ;
- число атомов кислорода в молекуле горючего,  $n_o = 0$ ;
- значение корректировочного параметра,  $\beta = 1$  (по табл. ПЗ.2 [13]);
- коэффициент участия горючего во взрыве,  $Z = 0,1$  [13];
- степень расширения продуктов сгорания,  $\sigma = 7$  (ПЗ.46) [13];
- скорость звука в воздухе,  $C_0 = 340$  м/с [13];
- удельная теплота сгорания для типичных углеводородов,  $E_{уд0} = 44 \cdot 10^6$  Дж/кг [13];
- атмосферное давление,  $p_0 = 101325$  Па;
- класс горючего вещества по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов. Для пропана Класс 2 (по табл. ПЗ.1 [13]);
- класс окружающего пространства по степени загроможденности. Для отдельно стоящих технологических установок, принимаем класс III [13];
- класс режима сгорания газозвушной смеси принимаем 3, дефлаграция (по табл. ПЗ.3 [13]).

Последовательность проведения расчета

Определяем массу СУГ, содержащуюся в облаке, с концентрацией между нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени:

$$m_g = m_r Z \quad (2.9)$$

$$m_g = 7424 \cdot 0,1 = 742,4 \text{ кг.}$$

( $m_r$  - масса испарившегося газа, кг, из раздела 2.4.5.2)

Находим значение удельного энерговыделения при горении СУГ по формуле:

$$E_{\text{уд}} = \beta \cdot E_{\text{уд}0} \quad (2.10)$$

$$E_{\text{уд}} = 1,44 \cdot 10^6 = 44 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг.}$$

Определяем стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания:

$$k = n_c + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} \quad (2.11)$$

$$k = 3 + \frac{8-0}{4} - \frac{0}{2} = 5.$$

Определяем стехиометрическую концентрацию паров СУГ по формуле:

$$C_{cm} = \frac{100}{1 + 4,84k} \quad (2.12)$$

$$C_{cm} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 5} = 3,97 \% (\text{об.}).$$

Концентрацию горючего в смеси ( $C_r$ ) принимаем равной НКПРП,  $C_r = C_{\text{нкпр}} = 2,3 \% (\text{об.}).$

Находим плотность воздуха при расчетной температуре и атмосферном давлении:

$$\rho_g = \frac{M_g}{V_g(1+0,00367t_p)} \quad (2.13)$$

$$\rho_g = \frac{28,98}{22,413 \cdot (1+0,00367 \cdot 41)} = 1,126 \text{ кг/м}^3.$$

При определении эффективного энергозапаса горючей смеси ( $E$ ) учитываем, что облако расположено на поверхности земли, так как плотность паров СУГ при прочих равных условиях выше, чем плотность воздуха:

$$E = \begin{cases} 2m_g E_{y\partial}, & \text{если } C_2 \leq C_{cm} \\ 2m_g E_{y\partial} \frac{C_{cm}}{C_2}, & \text{если } C_2 > C_{cm} \end{cases}; \quad (2.14)$$

Так как  $C_2 \leq C_{cm}$ , то

$$E = 2m_g E_{y\partial} = 2 \cdot 742,4 \cdot 44 \cdot 10^6 = 6,53 \cdot 10^{10} \text{ Дж.}$$

Видимую скорость фронта пламени для 3-го класса режима сгорания газозадушной смеси определяем по формуле:

$$u_p = k_1 m_g^{1/6} \quad (2.15)$$

где  $k_1$  - константа, равная 43 [п.16, приложение 3, 13].

$$u_p = 43 \cdot 742,4^{1/6} = 129,4 \text{ м/с,}$$

Так как  $u_p \leq 300$ , то принимаем  $u_p = 300 \text{ м/с}$

Безразмерное расстояние от центра облака рассчитываем по формуле:

$$r_x = \frac{r}{(E/p_0)^{1/3}}, \quad (2.16)$$

где  $r$  расстояние от человека до центра резервуара, 20 м.  $p_0$  - атмосферное давление, Па,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ .

$$r_x = \frac{20}{(6,53 \cdot 10^{10} / 101325)^{1/3}} = 0,23.$$

Так как  $r_x < 0,34$  (п.16, приложение 3 [13]), то в формулах для расчета безразмерного давления и безразмерного импульса используем  $r_x = 0,34$ .

Рассчитываем величину безразмерного давления

$$p_x = \left( \frac{u^2}{c_0^2} \right) \left( \frac{\sigma-1}{\sigma} \right) \left( \frac{0,83}{r_x} - \frac{0,14}{r_x^2} \right) \quad (2.17)$$

$$p_x = \left( \frac{300^2}{340^2} \right) \left( \frac{7-1}{7} \right) \left( \frac{0,83}{0,34} - \frac{0,14}{0,34^2} \right) = 0,824,$$

а величину безразмерного импульса фазы сжатия находим из соотношения:

$$I_x = W(1 - 0,4W) \left( \frac{0,06}{r_x} + \frac{0,01}{r_x^2} - \frac{0,0025}{r_x^3} \right) \quad (2.18)$$

$$\text{где } W = \frac{u}{c_0} \left( \frac{\sigma-1}{\sigma} \right) = \frac{300}{340} \left( \frac{7-1}{7} \right) = 0,756,$$

тогда

$$I_x = 0,756(1 - 0,4 \cdot 0,756) \left( \frac{0,06}{0,34} + \frac{0,01}{0,34^2} - \frac{0,0025}{0,34^3} \right) = 0,091,$$

Размерную величину избыточного давления определяем по формуле:

$$\Delta p = p_x p_0 \quad (2.19)$$

$$\Delta p = 0,824 \cdot 101325 = 83,4 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Размерную величину импульса фазы сжатия находим по формуле:

$$I^+ = I_x p_0^{\frac{2}{3}} E^{\frac{1}{3}} / C_0 \quad (2.20)$$

$$I^+ = 0,091 \cdot 101325^{\frac{2}{3}} \cdot (6,53 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{3}} / 340 = 2336 \text{ Па}\cdot\text{с}$$

#### 2.4.5.5. Расчет интенсивности теплового излучения при пожаре проливе

Тепловое воздействие пожара пролива СУГ может привести к причинению вреда здоровью и гибели людей, потере устойчивости соседнего оборудования и возникновению новых очагов пожара. Расчетное определение размеров зон теплового излучения пожара пролива СУГ производим в соответствии с методом, приведенным в [13].

Исходные данные для проведения расчета:

- площадь пожара принимаем равной фактической площади пролива СУГ,  $F_n = 197 \text{ м}^2$  (см. п. 2.4.5.1).

Последовательность проведения расчета

Находим эффективный диаметр пролива СУГ:

$$d = \sqrt{4F_n/\pi} \quad (2.21)$$

$$d = \sqrt{4 \cdot 197 / 3,14} = 15,8 \text{ м.}$$

Среднеповерхностную плотность теплового излучения СУГ в зависимости от диаметра пролива определяем по табл. ПЗ.4 [13] методом интерполяции.

$$E_f = 69,8 \text{ кВт/м}^2.$$

Найдем значение

$$u^* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m'gd}{\rho_n}}} \quad (2.22)$$

где  $w_0$  – скорость ветра, м/с. Поскольку, пожар пролива имеет место, как в штиль, так и в ветряную погоду, то примем пограничное значение  $w_0 = 0,5$  м/с;

$m'$  - удельная массовая скорость выгорания топлива, для СУГ по табл. ПЗ.4 [13] она составляет  $0,1$  кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\rho_n$  – плотность насыщенных паров СУГ при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>. Для пропана при минус 42 °С по (2.13) составит

$$\rho_n = \frac{M_g}{V_o(1+0,00367t_p)} = \frac{44,1}{22,413(1+0,00367(-42))} = 2,33 \text{ кг/м}^3$$

Тогда

$$u^* = \frac{0,5}{\sqrt[3]{\frac{0,1 \cdot 9,81 \cdot 15,8}{2,33}}} = 0,27.$$

При  $u^* < 1$  длину пламени определяем по формуле

$$L = 42d \left( \frac{m'}{\rho_n \sqrt{gd}} \right)^{0,61} = 42 \cdot 15,8 \left( \frac{0,1}{1,126 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 15,8}} \right)^{0,61} = 32,54 \text{ м}, \quad (2.23)$$

При  $u^* \geq 1$  используем формулу ПЗ.59 [13].

Найдем параметры, необходимые для определения факторов облученности для вертикальной и горизонтальной площадок:

$$a = \frac{2L}{d} = \frac{2 \cdot 32,54}{15,8} = 4,12 \quad (2.24)$$

$$b = \frac{2r}{d} = \frac{2 \cdot 20}{15,8} = 2,53 \quad (2.25)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b + 1)^2 - 2a(b + 1)\sin\theta)} \quad (2.26)$$

где  $\theta$  - угол отклонения пламени от вертикали при малой скорости ветра или его отсутствия принимаем  $\theta = 0$ .

Тогда

$$A = \sqrt{(4,12^2 + (2,53 + 1)^2 - 2 \cdot 4,12(2,53 + 1)\sin 0)} = 5,43$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b - 1)^2 - 2a(b - 1)\sin\theta)} \quad (2.27)$$

$$B = \sqrt{(4,12^2 + (2,53 - 1)^2 - 2 \cdot 4,12(2,53 - 1)\sin 0)} = 4,39$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cos^2 \theta)} \quad (2.28)$$

$$C = \sqrt{(1 + (2,53^2 - 1) \cos^2 0)} = 2,53$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} = \sqrt{\frac{2,53-1}{2,53+1}} = 0,66 \quad (2.29)$$

$$E = \frac{a \cos \theta}{b-a \sin \theta} = \frac{4,12 \cos 0}{2,53-4,12 \sin 0} = 1,63 \quad (2.30)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} = \sqrt{(2,53^2 - 1)} = 2,33 \quad (2.31)$$

Фактор облученности для вертикальной площадки определяем по формуле:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left\{ -E \operatorname{arctg} D + E \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta)}{AB} \right] \operatorname{arctg} \left( \frac{AD}{B} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\cos \theta}{C} \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] \right\} \quad (2.32)$$

$$F_V =$$

$$= \frac{1}{3,14} \left\{ -1,63 \operatorname{arctg} 0,66 + \right. \\ \left. + 1,63 \left[ \frac{4,12^2 + (2,53+1)^2 - 2 \cdot 2,53(1+4,12 \sin 0)}{5,42 \cdot 4,39} \right] \operatorname{arctg} \left( \frac{5,42 \cdot 0,66}{4,39} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\cos 0}{2,53} \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{4,12 \cdot 2,53 - 2,32^2 \sin 0}{2,32 \cdot 2,53} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{2,32^2 \sin 0}{2,32 \cdot 2,53} \right) \right] \right\}$$

$$F_V = 0,06$$

и для горизонтальной площадки по формуле:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{1}{D} + \frac{\sin \theta}{C} \left[ \operatorname{arctg} \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} + \operatorname{arctg} \frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta)}{AB} \right] \operatorname{arctg} \left( \frac{AD}{B} \right) \right\} \quad (2.33)$$

$$F_H =$$

$$\frac{1}{3,14} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{1}{0,66} + \right. \\ \left. + \frac{\sin 0}{2,53} \left[ \operatorname{arctg} \frac{4,12 \cdot 2,53 - 2,32^2 \sin 0}{2,32 \cdot 2,53} + \operatorname{arctg} \frac{2,32^2 \sin 0}{2,32 \cdot 2,53} \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{4,12^2 + (2,53+1)^2 - 2(2,53+1+4,12 \cdot 2,53 \sin \theta)}{5,42 \cdot 4,39} \right] \operatorname{arctg} \left( \frac{5,42 \cdot 0,66}{4,39} \right) \right\}$$

$$F_H = 0,11$$

Угловой коэффициент облученности находим по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} \quad (2.34)$$

$$F_q = \sqrt{0,06^2 + 0,11^2} = 0,13.$$

Коэффициент пропускания атмосферы - по формуле:

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4}(r - 0,5d)] \quad (2.35)$$

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4}(20 - 0,5 \cdot 15,8)] = 0,99.$$

Интенсивность теплового излучения определяем из выражения:

$$q_{n.n.} = E_f F_q \tau \quad (2.36)$$

$$q_{n.n.} = 69,8 \cdot 0,13 \cdot 0,99 = 8,71 \text{ кВт/м}^2.$$

#### 2.4.5.6. Расчет интенсивности теплового излучения при возникновении огненного шара

Огненный шар представляет собой крупномасштабное диффузионное пламя сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающееся над поверхностью земли.

Исходные данные для проведения расчета:

- масса продукта, поступившего в окружающее пространство,  $m_{жс} = 7424 \text{ кг}$  (см. п. 2.4.5.2);

- среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени для огненного шара принимаем  $E_f = 350 \text{ кВт/м}^2$  в соответствии с п.24 приложения 3 [13].

Последовательность проведения расчета.

Эффективный диаметр огненного шара определяем по формуле:

$$D_s = 6,48 m_{жс}^{0,325} \quad (2.37)$$

$$D_s = 6,48 \cdot 7424^{0,325} = 117,36 \text{ м.}$$

В соответствии с п.24 приложения 3 [13] высоту центра огненного шара принимаем равной половине эффективного диаметра  $H = D_s/2 = 58,68 \text{ м.}$

Угловой коэффициент облученности находим по формуле:

$$F_q = \frac{D_s^2}{4(H^2+r^2)} = \frac{117,36^2}{4(58,68^2+20^2)} = 0,9. \quad (2.38)$$

Коэффициент пропускания атмосферы для огненного шара рассчитываем по формуле:

$$\tau = \exp \left[ -7,0 \cdot 10^{-4} \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right] \quad (2.39)$$

$$\tau = \exp \left[ -7,0 \cdot 10^{-4} \left( \sqrt{20^2 + 58,68^2} - \frac{117,36}{2} \right) \right] = 1.$$

Интенсивность теплового излучения огненного шара определяем из выражения (2.37):

$$q_{ош} = E_f F_q \tau = 350 \cdot 0,9 \cdot 1 = 315 \text{ кВт/м}^2.$$

#### 2.4.5.7. Расчет зоны поражения от воздействия факела при струйном горении СУГ

Исходные данные и допущения при проведении расчетов (раздел IX приложение 3) [13]:

При струйном истечении сжиженных углеводородных газов возникает опасность образования диффузионных факелов.

Зона непосредственного контакта пламени с окружающими объектами определяется размерами факела.

Длина факела не зависит от направления истечения продукта и скорости ветра.

Наибольшую опасность представляют горизонтальные факелы, условную вероятность реализации которых принимаем равной **0,67** год<sup>-1</sup>. Условную вероятность образования вертикальных факелов принимаем  $1 - 0,67 = 0,33$  год<sup>-1</sup>.

Воздействие горизонтального факела на соседние сооружения, которое приводит к его разрушению (каскадному развитию аварии) и поражению человека, происходит в 30°-м секторе, ограниченном радиусом, равным длине факела. Вероятность того, что человек будет находиться в 30°-м секторе поражения горизонтального факела будет составлять 30°/360°, т.е. 1/12.



За пределами указанного сектора на расстояниях от  $L_F$  до  $1,5 L_F$  тепловое излучение от горизонтального факела составляет  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

При истечении жидкой фазы СУГ из отверстия с эквивалентным диаметром до 100 мм при мгновенном воспламенении происходит полное сгорание истекающего продукта в факеле без образования пожара пролива. В расчетах будем рассматривать истечение жидкой фазы СУГ как наиболее пожароопасной.

При мгновенном воспламенении струи газа возможность формирования волн давления не учитываем.

Последовательность проведения расчета размеров факела.

Длина факела при струйном горении определяем по формуле:

$$L_F = Kq_L^{0,4}, \quad (2.40)$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент, который при истечении жидкой фазы СУГ принимаем равным 15 (раздел IX приложение 3 [13]);  $q_L$  – массовый расход жидкой фазы СУГ, кг/с (см. п. 2.4.4).

Ширину факела при струйном горении определяем по формуле:

$$D_F = 0,15L_F, \quad (2.41)$$

Результаты расчета длины и ширины факела при струйном горении жидкой фазы СУГ в случае образования отверстий различного диаметра в корпусе резервуара представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Длина и ширина факела при струйном горении жидкой фазы СУГ при различном диаметре истечения в корпусе резервуара

$d_{\text{отв}}, \text{ м}$	$f_{\text{отв}}, \text{ м}^2$	$q_L, \text{ кг/с}$	$L_F, \text{ м}$	$D_F, \text{ м}$
0,0050	$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,77	13,5	2,03
0,0125	$1,2 \cdot 10^{-4}$	4,42	27,2	4,08
0,0250	$4,9 \cdot 10^{-4}$	18,05	47,7	7,16
0,0500	$19,6 \cdot 10^{-4}$	72,38	83,2	12,48
0,1000	$78,5 \cdot 10^{-4}$	289,8	144,9	21,74

Последовательность расчет интенсивности теплового излучения от вертикальных факелов.

Тепловое излучение от вертикальных факелов может быть определено по формулам (2.24-2.36). При этом принимаем  $L = L_F$ ,  $D = D_F$ ,  $\theta = 0$ , а среднеповерхностную плотность теплового излучения СУГ определяем по табл. ПЗ.4 [13] методом интерполяции в зависимости от диаметра факела.

Результаты расчетов по формулам (2.24-2.34) углового коэффициента облученности, а также его составляющих и необходимых параметров представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Результаты расчетов углового коэффициента облученности, а также его составляющих и необходимых параметров

$d_{отв}, \text{ м}$	Значение параметра										
	$a$	$b$	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	$F$	$F_V$	$F_H$	$F_q$
0,0050	13,30	19,70	24,61	22,95	19,70	0,95	0,68	19,68	0,01	0,01	0,01
0,0125	13,33	9,80	17,16	15,98	9,80	0,90	1,36	9,75	0,02	0,02	0,03
0,0250	13,32	5,59	14,86	14,09	5,59	0,83	2,39	5,50	0,02	0,05	0,05
0,0500	13,33	3,21	13,98	13,51	3,21	0,72	4,16	3,05	0,02	0,10	0,10
0,1000	13,33	1,84	13,63	13,36	1,84	0,54	7,25	1,54	0,02	0,18	0,18

Интенсивность теплового излучения факела определяем из выражения (2.36) при ранее определенном значении коэффициента пропускания атмосферы по формуле (2.35). Результаты расчета сведем в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Значения среднеповерхностной плотность теплового излучения, коэффициента пропускания атмосферы и интенсивность теплового излучения факела в зависимости от диаметра истечения

$d_{отв}, \text{ м}$	Значение параметра		
	$E_F, \text{ кВт/м}^2$	$\tau$	$q, \text{ кВт/м}^2$
0,0050	80,0	0,99	0,75
0,0125	80,0	0,99	2,18
0,0250	80,0	0,99	4,34
0,0500	76,0	0,99	7,56
0,1000	60,4	0,99	10,99

## 2.4.6. Оценка последствий воздействия ОФП на человека

### 2.4.6.1. Детерминированные и вероятностные критерии оценки поражающего действия опасных факторов пожара на человека

Детерминированные критерии показывают значения параметров опасного фактора пожара, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения людей.

В случае использования детерминированных критериев условная вероятность поражения принимается равной 1, если значение критерия превышает предельно-допустимый уровень, и равной 0, если значение критерия не превышает предельно допустимый уровень поражения людей.

Вероятностные критерии показывают, какова условная вероятность поражения людей при заданном значении ОФП [13].

В расчетах пожарных рисков предпочтение следует отдавать вероятностному подходу.

### 2.4.6.2. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением пожара-вспышки

Для пожара-вспышки принимают, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературными продуктами сгорания газовойоздушного облака, равна 1, за пределами этой зоны условную вероятность поражения человека принимают равной 0 (детерминированный подход) [13].

$$Q_{\text{всп.}} = \begin{cases} 1, & \text{если } r \leq R_F; \\ 0, & \text{если } r > R_F; \end{cases} \quad (2.42)$$

Так как  $20 \text{ м} \leq 112,8 \text{ м}$ , то  $Q_{\text{всп.}} = 1 \text{ год}^{-1}$ .

### 2.4.6.3. Условная вероятность поражения человека при быстром сгорании (взрыве) газовой смеси в открытом пространстве

Для определения условной вероятности поражения человека, находящегося в здании, волной давления используем пробит-функцию вида (вероятностный подход) П4.4 [13]:

$$P_r = 5,0 - 0,26 \cdot \ln V, \quad (2.43)$$

где

$$V = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I^+} \right)^{9,3} = \left( \frac{17500}{83400} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{2336} \right)^{9,3} = 2,01 \cdot 10^{-6}. \quad (2.44)$$

(значения  $\Delta P$  и  $I^+$  приняты из раздела 2.4.5.4)

и значение пробит-функции составит

$$P_r = 5,0 - 0,26 \cdot \ln 2,01 \cdot 10^{-6} = 8,41.$$

Значение условной вероятности поражения человека, находящегося в здании, при быстром сгорании (взрыве) газовой смеси в открытом пространстве, определяем по таблице П4.2 [13]:  $Q_{в.д.} = 1 \text{ год}^{-1}$ .

Для определения условной вероятности поражения человека, находящегося на открытой площадке, волной давления используем пробит-функцию вида П4.3 [13]:

$$P_r = 5,0 - 5,74 \ln S, \quad (2.45)$$

где

$$S = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{l}}, \quad (2.46)$$

$$\bar{p} = \frac{\Delta p}{p_0} = \frac{83,4 \cdot 10^3}{101325} = 7,88, \quad (2.47)$$

$$\bar{l} = \frac{I^+}{p_0^{1/2} m^{1/3}} = \frac{2336}{101325^{1/2} 70^{1/3}} = 1,78, \quad (2.48)$$

(здесь  $m$  - масса тела человека, принимаемая равной 70 кг).

Тогда

$$S = \frac{4,2}{7,88} + \frac{1,3}{1,78} = 1,26$$

и значение пробит-функции составит

$$P_r = 5,0 - 5,74 \ln 1,26 = 3,67.$$

Значение условной вероятности поражения человека, находящегося вне здания, при быстром сгорании (взрыве) газовоздушной смеси в открытом пространстве определяем по таблице П4.2 [13]:  $Q_{в.д.} = 0,1 \text{ год}^{-1}$ .

#### 2.4.6.4. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением пожара пролива

Для оценки поражения человека тепловым излучением пожара пролива используем пробит-функцию вида (вероятностный подход) [13]:

$$P_r = -12,8 + 2,56 \ln(tq_{п.п.}^{4/3}). \quad (2.49)$$

где  $t$  - величина эффективного времени экспозиции.

$$t = t_0 + x/u, \quad (2.50)$$

где  $t_0$  - характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, допускается принимать равным 5 с;

$x$  - расстояние от места расположения человека до безопасной зоны, то есть зоны, где интенсивность теплового излучения менее  $4 \text{ кВт/м}^2$  (для всех вариантов расчета принимаем  $x = 20 \text{ м}$ ). Стоит отметить, что данное расстояние зависит от расположения исследуемого объекта в сочетании к нему не относящихся объектам, а также может быть рассчитано.

$u$  - средняя скорость движения человека к безопасной зоне, допускается принимать равной  $5 \text{ м/с}$ .

Тогда

$$t = 5 + 20/5 = 9 \text{ с}$$

и значение пробит-функции составит

$$P_r = -12,8 + 2,56 \ln(9 \cdot 8,71^{\frac{4}{3}}) = 0,21.$$

Значение условной вероятности поражения человека тепловым излучением пожара пролива определяем по таблице П4.2 [13]:  $Q_{л.п.} = 0 \text{ год}^{-1}$ .

#### 2.4.6.5. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением огненного шара

Для оценки поражения человека тепловым излучением огненного шара используем пробит-функцию вида (вероятностный подход) [13]:

$$P_r = -12,8 + 2,56 \ln(tq_{\text{ош}}^{4/3}). \quad (2.51)$$

здесь величину эффективного времени экспозиции определяем по формуле:

$$\begin{aligned} t &= 0,92 m_{\text{ж}}^{0,303} \\ t &= 0,92 \cdot 7424^{0,303} = 14 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Тогда значение пробит-функции составит

$$P_r = -12,8 + 2,56 \ln(14 \cdot 315^{4/3}) = 13,59$$

Значение условной вероятности поражения человека тепловым излучением огненного шара определяем по таблице П4.2 [13]:  $Q_{о.ш.} = 1 \text{ год}^{-1}$ .

#### 2.4.6.6. Условная вероятность поражения человека тепловым излучением при факельном горении СУГ

Условную вероятность поражения человека, находящегося как в здании, так и на открытой площадке, попавшего в зону непосредственного воздействия горизонтального равной 1.

Следовательно, по табл. 2.4 видно, что человек будет поражен ОФП горизонтального факельного горения при всех диаметрах отверстия истечения, за исключением  $d_{\text{отв}} = 5 \text{ мм}$ , т.к. в данном случае  $L_F = 13,5 \text{ м} < r = 20 \text{ м}$ .

За пределами сектора непосредственного влияния горизонтального факела на расстояниях от  $L_F$  до  $1,5 L_F$  тепловое излучение от горизонтального факела составляет  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

Для определения значения условной вероятности поражения человека тепловым излучением используем пробит-функцию (2.49):

$$P_r = -12,8 + 2,56 \ln(tq_{\text{п.п.}}^{4/3}) = -12,8 + 2,56 \ln(9 \cdot 10^3) = 0,68$$

Значение условной вероятности поражения человека тепловым излучением горизонтального факела вне зоны его непосредственного действия определяем по таблице П4.2 [13]:  $Q = 0$ .

Значение условной вероятности поражения человека тепловым излучением вертикального факела, представленные в табл. 2.7, определяем, используя пробит-функцию (2.49) и интенсивность теплового излучения факела из табл. 2.6.

Табл. 2.7.

Значение условной вероятности поражения человека тепловым излучением вертикального факела и соответствующие им значения пробит-функции при различных диаметрах отверстия истечения

$d_{\text{отв}}$ , М	Пробит-функция $Pr$	Условная вероятность поражения человека, $\text{год}^{-1}$
0,0050	-8,14	0
0,0125	-4,50	0
0,0250	-2,16	0
0,0500	-0,27	0
0,1000	1,00	0

Таким образом, при реализации сценария, связанного с образованием факельного горения, на человека будут оказывать влияние ОФП только от горизонтального факела, вероятность проявления которого равна  $0,67$ , при всех диаметрах истечения, за исключением  $d_{\text{отв}} = 5 \text{ мм}$ . При этом условная вероятность поражения человека тепловым излучением факела составит  $Q_{\text{ф.г.}} = 1 \text{ год}^{-1}$  с вероятностью нахождения человека в зоне его действия равной  $1/12$  (см. 2.4.5.7).

### 2.4.6.7. Условная вероятность поражения человека от совместного независимого воздействия нескольких ОФП

В соответствии с [13] условную вероятность поражения человека от совместного независимого воздействия несколькими опасными факторами в результате  $j$ -ого сценария развития пожароопасных ситуаций определяем по формуле

$$Q_{aj}(a) = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k Q_{ajk}(a)) \quad (2.53)$$

При реализации сценариев 2, 7, 12, 17, 22, 27 на человека будет оказывать влияние независимое воздействие двух опасных факторов пожара: волна давления при взрыве газозвдушного облака и тепловое излучение пожара пролива, вероятность реализации, которых примем равной 1. В этом случае условная вероятность поражения человека, находящегося в здании на территории АГЗС, составит

$$Q_{в.д.п.п.} = 1 - (1 - Q_{вд})(1 - Q_{пп}) = 1 - (1 - 1)(1 - 0) = 1 \text{ год}^{-1}.$$

А условная вероятность поражения человека, находящегося вне здания на территории АГЗС, составит

$$Q_{в.д.п.п.} = 1 - (1 - Q_{вд})(1 - Q_{пп}) = 1 - (1 - 0,1)(1 - 0) = 0,1 \text{ год}^{-1}$$

При реализации сценариев 3, 8, 13, 18, 23, 28 на человека будет оказывать влияние независимое воздействие двух опасных факторов пожара: воздействие высокотемпературными продуктами сгорания газозвдушного облака в режиме пожара – вспышки и тепловое излучение пожара пролива, вероятность реализации, которых примем равной 1. В этом случае условная вероятность поражения человека, находящегося как в здании, так и вне здания на территории АГЗС, составит

$$Q_{всп.п.п.} = 1 - (1 - Q_{всп})(1 - Q_{п.п.}) = 1 - (1 - 1)(1 - 0) = 1 \text{ год}^{-1}$$

При реализации сценария 26 на человека будет оказывать влияние независимое воздействие двух опасных факторов пожара: тепловое излучение огненного шара и тепловое излучение пожара пролива, т.к. может испариться не вся жидкость, вероят-



ность реализации, которых примем равной 1. В этом случае условная вероятность поражения человека, находящегося как в здании, так и вне здания на территории АГЗС, составит

$$Q_{\text{о.ш.п.п.}} = 1 - (1 - Q_{\text{о.ш.}})(1 - Q_{\text{п.п.}}) = 1 - (1 - 1)(1 - 0) = 1$$

#### 2.4.7. Индивидуальный пожарный риск для клиентов АГЗС

Величину потенциального пожарного риска  $P(r)$  в определенной точке ( $r$ ) на территории объекта при эксплуатации резервуара под давлением с СУГ определяем по формуле:

$$P(r) = \sum_{j=1}^J Q_j Q_{dj}(r), \quad (2.54)$$

где  $j$ - число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров, ветвей логического дерева событий);  $Q_j$ - частота реализации в течение года  $j$ -го сценария развития пожароопасных ситуаций, год<sup>-1</sup>;  $Q_{dj}(r)$  - условная вероятность поражения человека в определенной точке территории ( $r$ ) в результате реализации  $j$ -го сценария развития пожароопасных ситуаций, отвечающего определенному инициирующему аварии событию.

Учитывая влияние условной вероятности поражения человека при реализации каждого сценария, не учитывая нулевые значения вероятностей, получим

$$\begin{aligned} P(20) = & (Q_6 + Q_{11} + Q_{16} + Q_{21})Q_{\text{фг}} \\ & + Q_{26}Q_{\text{о.ш.п.п.}} + (Q_2 + Q_7 + Q_{12} + Q_{17} + Q_{22} + Q_{27})Q_{\text{в.д.п.п.}} + \\ & + (Q_3 + Q_8 + Q_{13} + Q_{18} + Q_{23} + Q_{28})Q_{\text{всп.п.п.}} + Q_{31}Q_{\text{о.ш.}} \end{aligned} \quad (2.55)$$

- для человека, находящегося в здании на территории АГЗС

$$\begin{aligned} P_{\text{зд}}(20) = & (3,5 \cdot 10^{-7} + 2,17 \cdot 10^{-7} + 5,7 \cdot 10^{-7} + 2,6 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 \cdot 0,67 \cdot 1/12 + \\ & + 0,6 \cdot 10^{-7} \cdot 1 + \\ & + (0,02 \cdot 10^{-7} + 0,12 \cdot 10^{-7} + 0,07 \cdot 10^{-7} + 0,48 \cdot 10^{-7} + 0,21 \cdot 10^{-7} + 1,05 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 + \\ & + (0,26 \cdot 10^{-7} + 0,37 \cdot 10^{-7} + 0,23 \cdot 10^{-7} + 0,32 \cdot 10^{-7} + 0,14 \cdot 10^{-7} + 0,03 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 + \\ & + 250 \cdot 10^{-7} \cdot 1 = 2,547 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1} \end{aligned}$$

- для человека, находящегося на открытой площадке, на территории АГЗС

$$P_{on}(20) = (3,5 \cdot 10^{-7} + 2,17 \cdot 10^{-7} + 5,7 \cdot 10^{-7} + 2,6 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 \cdot 0,67 \cdot 1/12 + \\ + 0,6 \cdot 10^{-7} \cdot 1 + \\ + (0,02 \cdot 10^{-7} + 0,12 \cdot 10^{-7} + 0,07 \cdot 10^{-7} + 0,48 \cdot 10^{-7} + 0,21 \cdot 10^{-7} + 1,05 \cdot 10^{-7}) \cdot 0,1 + \\ + (0,26 \cdot 10^{-7} + 0,37 \cdot 10^{-7} + 0,23 \cdot 10^{-7} + 0,32 \cdot 10^{-7} + 0,14 \cdot 10^{-7} + 0,03 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 + \\ + 250 \cdot 10^{-7} \cdot 1 = 2,529 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

где  $0,67 \text{ год}^{-1}$  - условная вероятность реализации горизонтального факела,  $1/12$  - вероятность нахождения человека в зоне его действия.

Расчет индивидуального пожарного риска для работника объекта рассчитываем по формулам (п. 38 [13]):

- для работника объекта при его нахождении в здании объекта

$$R_m = \sum_{i=1}^N P_i q_{im}, \quad (2.56)$$

где  $P_i$  – величина потенциального риска в  $i$ -ом помещении здания,  $\text{год}^{-1}$ ;  $q_{im}$  – вероятность присутствия работника в  $i$ -ом помещении,  $N$  – число помещений в здании, сооружении, строении.

Вероятность присутствия работника в расчетной области территории объекта или помещении определяется в зависимости от времени нахождения человека в данных областях в течение года на основе решений по организации эксплуатации и технического обслуживания оборудования и зданий объекта.

Вероятность присутствия работника в здании АГЗС

$$q_{зд} = \frac{5 \cdot 8/2}{7 \cdot 24} = 0,208 \text{ год}^{-1}$$

где 5 – число рабочих дней в неделю; 8 – продолжительность рабочей смены работника, из которого половину он проводит в здании объекта, ч; 7 – количество дней в недели; 24 - продолжительность суток, ч;

Тогда, принимая, что здание состоит из единственного помещения, где находится человек, то индивидуальный пожарный риск составит

$$R_m^{зд.} = P_{зд.}(20)q_{зд} = 2,646 \cdot 10^{-5} \cdot 0,208 = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

- для работника объекта при его нахождении на территории объекта:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im}P(i), \quad (2.57)$$

где  $P(i)$  – величина потенциального риска в  $i$ -ой области территории объекта,  $\text{год}^{-1}$ ;  $q_{im}$  – вероятность присутствия работника в  $i$ -ой области территории объекта.

Поскольку, время нахождения работника в разных областях территории объекта равномерно распределено в течение его рабочей смены, то вероятность присутствия работника на открытой площадке в течение года составит:

$$q_{оп} = q_{зд.} = 0,208 \text{ год}^{-1} \quad (2.58),$$

Тогда, на открытой площадке на территории АГЗС индивидуальный пожарный риск составит

$$R_m^{он} = P_{он}(20)q_{он} = 2,628 \cdot 10^{-5} \cdot 0,208 = 5,47 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

Индивидуальный риск работника объекта определяется как сумма величин индивидуального риска при нахождении работника на территории и в зданиях объекта.

$$R_m = R_m^{зд.} + R_m^{он} = 5,5 \cdot 10^{-6} + 5,47 \cdot 10^{-6} = 1,097 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1} \quad (2.59)$$

При расчете индивидуального пожарного риска для людей находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, индивидуальный пожарный риск принять равным величинам потенциального пожарного риска в этой зоне, рассчитанной по формуле (2.54), п. 42 [13].

В селитебной зоне вблизи объекта необходимо также определять значение социального пожарного риска по формулам, представленным в п. 43 [13]. Для упрощения задачи, в заданиях по вариантам, представленных в табл. 2.5, примем, что сценариев развития пожароопасных ситуаций, приводящих к гибели более 10 человек, не существует. Поэтому оценку соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности будем вести только по величине индивидуального пожарного риска.

#### **2.4.8. Соответствие технологического процесса хранения СУГ в одностенном резервуаре на территории АГЗС уровню пожарной безопасности**

В соответствии с ч.4, п. 1, ст.93 [23] величина индивидуального пожарного риска в зданиях, сооружениях и на территориях производственных объектов не должна превышать одну миллионную в год. В ч.4, п. 3, ст.93 [23] сказано, что для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной миллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятитысячной в год. При этом должны быть предусмотрены меры по обучению персонала действиям при пожаре и по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска

В нашем случае индивидуальный пожарный риск больше одной миллионной в год и меньше одной десятитысячной, следовательно, заданный производственный объект с точки зрения обеспечения пожарной безопасности, можно эксплуатировать лишь тогда, когда будут предусмотрены меры по обучению персонала действиям при пожаре и по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска

Анализируя расчет пожарного риска АГЗС можно сделать вывод, что определяющим показателем, влияющим на итоговое значение индивидуального пожарного риска, является вероятность внешнего теплового воздействия на резервуар под влиянием очага пожара или солнечного излучения. Кроме того, уменьшение частоты реализации иницирующих пожароопасную ситуацию событий позволит снизить значение индивидуального пожарного риска до значения менее чем одна миллионная в год, а значит обеспечить выполнение АГЗС требуемых норм пожарной безопасности без дополнительных мер.

Расчет индивидуального пожарного риска для людей находящихся в селитебной зоне вблизи объекта следует проводить аналогично расчету, рассмотренному в примере, однако сравнение полученного значения с нормативным значением необходимо проводить в соответствии с ч.4, п. 4, 4<sup>1</sup> ст.93 [23]:

- величина индивидуального пожарного риска в результате воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, не должна превышать одну стомиллионную в год.

- для производственных объектов, на которых для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной стомиллионной в год и (или) величины социального пожарного риска одной десятимиллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной миллионной в год и (или) социального пожарного риска до одной тысячной в год соответственно. При этом должны быть предусмотрены средства оповещения людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения, о пожаре на производственном объекте, а также дополнительные инженерно-технические и организационные мероприятия по обеспечению их пожарной безопасности и социальной защите.

## Контрольные вопросы к Главе 2

1. В чем заключается пожарная опасность АЗС с наличием газового моторного топлива и систем автономного газоснабжения?
2. При каких условиях и почему происходит испарение СУГ и в чем пожароопасность этого явления?
3. Где может образовываться взрывоопасная концентрация газозвдушной смеси и по какой причине?
4. Перечислите факторы, способствующие возникновению и развитию аварий при хранении СУГ.
5. Перечислите источники зажигания, которые могут возникнуть на объектах хранения СУГ в резервуарах.
6. Какие источники зажигания, по вашему мнению, являются более вероятными?
7. Поясните, в чем заключается принцип «максимальной проектной аварии»?
8. Какие данные могут быть использованы для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций?
9. В чем смысл построения логического дерева событий?
10. Какие положения учитываются при построении логических деревьев событий?
11. Что такое детерминированные и вероятностные критерии оценки поражающего действия опасных факторов пожара на человека?
12. Что такое радиус взрывоопасной зоны, которая образуются при разгерметизации резервуара с СУГ?
13. Как образуется факельное горения СУГ при аварии резервуара и в чем его опасность для человека?
14. Какими основными характеристиками описывается взрыв газозвдушной смеси в открытом пространстве?
15. Для чего необходимо знать значение пробит-функции?

16. Как определить величину потенциального пожарного риска?
17. Когда необходим расчет социального пожарного риска?
18. Какие инженерно-технические решения могут позволить снизить значение индивидуального пожарного риска применительно к объектам хранения СУГ в резервуарах под давлением?

Таблица 2.8

**Варианты заданий для расчета индивидуального пожарного риска объекта хранения СУГ  
в резервуарах под давлением к главе 2**

№ варианта	Объект	Наземный резервуар	Объем резервуара, м <sup>3</sup>	Тип покрытия площадки под резервуаром	Город	Сведения о человеке, для которого ведется расчет			
						работник объекта/частное лицо	число рабочих в неделю /про-долж. рабочей смены в день, ч	Место нахождения в день	Расстояние до резервуара, м
1	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	12	бетонное	Воронеж	работник объекта	3/18	в помещении	25
2	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двустенный*	50	грунто-вое	Москва	частное лицо		открытая площадка	80
3	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	16	бетонное	Архангельск	работник объекта	5/9	открытая площадка	20
4	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	одно-стенный	25	грунто-вое	Брянск	частное лицо		в помещении	100
5	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	двустенный*	12	грунто-вое	Астрахань	частное лицо		в помещении	40
6	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двустенный*	25	грунто-вое	Волгоград	частное лицо		в помещении	60
7	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	12	бетонное	Санкт-Петербург	работник объекта	4/12	открытая площадка	15
8	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двустенный*	20	грунто-вое	Сочи	частное лицо		в помещении	150
9	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	8	бетонное	Калининград	работник объекта	3/20	в помещении	15



№ варианта	Объект	Вид резервуара	Объем резервуара, м <sup>3</sup>	Тип покрытия площадки резервуаром	Город	Сведения о человеке, для которого ведется расчет			
						работник объекта/ частное лицо	число раб. дней в неделю / прочей долж. рабочей смены в день, ч	Место нахождения	Расстояние до резервуара, м
10	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	одно-стенный	16	грунтово-вое	Мурманск	частное лицо		в помещении	50
11	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	20	бетонное	Керчь	частное лицо		открытая площадка	30
12	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двухстенный*	80	грунтово-вое	Оренбург	частное лицо		открытая площадка	80
13	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	20	грунтово-вое	Севастополь	работник объекта	5/9	открытая площадка	18
14	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двухстенный*	100	грунтово-вое	Тюмень	частное лицо		в помещении	200
15	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	двухстенный*	50	бетонное	Челябинск	работник объекта	6/7	открытая площадка	32
16	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	одно-стенный	5	грунтово-вое	Липецк	частное лицо		в помещении	15
17	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	двухстенный*	50	бетонное	Челябинск	работник объекта	7/4	открытая площадка	22
18	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	одно-стенный	8	грунтово-вое	Краснодар	частное лицо		открытая площадка	25
19	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	8	грунтово-вое	Нальчик	работник объекта	3/16	в помещении	18
20	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двухстенный*	10	грунтово-вое	Норильск	частное лицо		в помещении	30

№ варианта	Объект	Вид резервуара	Объем резервуара, м <sup>3</sup>	Тип покрытия площадки под резервуаром	Город	Сведения о человеке, для которого ведется расчет		Расстояние до резервуара, м
						работник объекта/частное лицо	для работника: число раб. дней в неделю /про-долж рабочей смены в день, ч	
21	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	одно-стенный	10	бетонное	Ялта	частное лицо		44
22	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двустенный*	100	грунто-вое	Курек	частное лицо		80
23	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	двустенный*	16	грунто-вое	Казань	частное лицо		53
24	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	одно-стенный	80	грунто-вое	Грозный	частное лицо		130
25	Автомобильная газозаправочная станция (АГЭС)	двустенный*	12	бетонное	Саранск	работник объекта	6/6	23
26	Система автономного газоснабжения (САГЭС)	двустенный*	16	бетонное	Тула	частное лицо		55

\* Частоты реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для двустенных резервуаров принять на три порядка ниже справочных значений [Табл. ПП.1 13].

По результатам расчета величины индивидуального пожарного риска сделать вывод о соответствии объекта защиты требованиям пожарной безопасности. Предложить варианты компенсирующих мероприятий и возможные технические решения, которые позволят снизить расчетное значение величины пожарного риска на производственном объекте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены области применения сжиженного углеводородного газа и перспективы его использования. Рассмотрены технологии хранения и подачи (отпуска) сжиженного углеводородного газа в системах автономного газоснабжения и на автомобильных газозаправочных станциях. Приведена классификация резервуаров для хранения сжиженного углеводородного газа. Проведен анализ пожарной опасности сжиженного углеводородного газа, параметров технологического процесса его хранения и возможных источников зажигания.

На примере автомобильной газозаправочной станции проведен расчет индивидуального пожарного риска. Спрогнозированы события, перечень и значения частот возможных сценариев развития пожароопасных ситуаций при помощи процедуры построения логических деревьев событий. Изучены расчетные методы оценки опасных факторов пожар и их последствий на жизнь и здоровье человека. Проведено сравнение расчетных величин индивидуального пожарного риска с нормативным значением, на основании которого сделан вывод о соответствии (несоответствии) технологического процесса хранения сжиженного углеводородного газа в резервуаре под давлением.

Приведены контрольные вопросы и индивидуальные задания по вариантам расчета для закрепления теоретических и практических знаний.

Теоретический материал учебного пособия подобран из различных литературных источников и обработан на единой методической основе. Практическая часть выполнена на основе нормативных документов, умение работы с которыми позволит проводить анализ пожарной опасности различных производственных объектов по величине индивидуального пожарного риска. Учебное пособие позволяет углубленно изучать темы «Ме-

тодика анализа пожароопасности технологических процессов», «Пожарный риск для производственных объектов», «Пожарная безопасность промышленных объектов, связанных с обращением горючих газов» по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов» и активизировать самостоятельную творческую работу обучающихся. Материалы учебного пособия могут быть использованы при курсовом и дипломном проектировании.

Полученные знания будут необходимы при профессиональной подготовке обучающихся по специальности «Пожарная безопасность», решении практических задач, непосредственно связанных с анализом пожарной опасности и разработкой мер противопожарной безопасности на промышленных объектах. Информация, представленная в учебном пособии, будет полезна научным работникам, аспирантам и специалистам по пожарной безопасности проектных и экспертных организаций, работа которых связана с обеспечением пожарной безопасности производственных объектов с наличием наружных установок, в которых обращаются горючие вещества.

Изучение материалов учебного пособия будет способствовать пониманию у молодых специалистов направлений развития изобретательской деятельности, созданию и внедрению в производство современных технологий, оборудования и материалов, способствующих повышению пожарной безопасности, что является одной из основных задач МЧС России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Административный регламент министерства российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий исполнения государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности [Электронный ресурс]: Утв. Приказом МЧС России от 30.11.2016 № 644. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
2. Актуальность использования газомоторного топлива [Электронный ресурс] / Доступ от 17.01.2017 г. [<http://www.gazpromlpg.ru/index.php?id=212>].
3. Воробьев В. В. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Методологические и нормативные основы определения величин пожарных рисков на производственных объектах» [Текст]: Учеб.-метод. пособие / В. В. Воробьев, С. А. Швырков, С. А. Горячев. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 36 с.
4. Гордиенко Д.М. Оценка пожарного риска автозаправочных станций и разработка способов его снижения [Текст] / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России – 2001. – 174 с.
5. Гордиенко Д.М. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов [Текст] / Гордиенко Д. М., Шебеко Ю. Н., Шебеко А. Ю. и др. – М.: ВНИИПО, 2012. – 242 с.
6. Горячев С.А. Основы технологии, процессов и аппаратов пожаровзрывоопасных производств [Текст] / С.А. Горячев, А.И. Обухов, В.В. Рубцов, С.А. Швырков. – М.: Академия ГПС МЧС России – 2003. – 293 с.
7. ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Электронный ре-

сурс]: Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 29 декабря 1989 г. № 3683 (в редакции № 1 утв. в апреле 2000 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

8. ГОСТ 20448-90. Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления [Электронный ресурс]: Постановление Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29 декабря 1990 г. № 3605 (в ред. утв. в сентябре 1997 г, утв. в марте 2004 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

9. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс] : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

10. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: Справочник: в 2-х ч./ А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко– М.: ас. «Пожнаука» – 2004. – Ч.І- 713 с.; Ч.ІІ- 774 с.

11. Котов Д.В., Уразметова Л.Р. Современное состояние, перспективы и проблемы развития рынка газомоторного топлива в России [Текст] / Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2014. №1. С. 377-396.

12. Локализация пожара в Левобережном районе г.о.г. Воронеж [Электронный ресурс] / Главное управление МЧС России по Воронежской области. Доступ от 17.01.2017 г. [<http://36.mchs.gov.ru/operationalpage/operational/item/3602401/>].

13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: утв. Приказом МЧС России от 10 июля 2009 № 404: зарегистрировано в Минюсте России 17 авг. 2009 г. № 14541 (в ред. прика-

за МЧС России от 14.12.2010 N 649). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

14. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 17 августа 2016 г. № 806. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

15. Патент 2610800 Российская Федерация. МПК F17C 9/02, F25B 29/00, F17C 3/10. Способ изотермического хранения и регазификации сжиженного углеводородного газа [Текст] / Шевцов С.А., Каргашилов Д.В., Усачев Д.В., Хабибов М.-А У. – № 2015148410; заявл. 10.11.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. № 5.

16. Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы [Электронный ресурс]: Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 ноября 2013 № 558. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

17. Правила проведения расчетов по оценке пожарного риска [Электронный ресурс]: Утв. Постановлением Правительства РФ от 31 марта 2009 г. N 272. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

18. Романюк Е.В. Пожарная безопасность технологических процессов [Текст]: Учебное пособие / Е.В. Романюк, Д.В. Каргашилов. – Воронеж.: Воронежский институт ГПС МЧС России – 2014. – 185 с.

19. Системы автономного и резервного газоснабжения [Текст]: справ. Изд. / Е. Шевцова, К. Александров, А. Кудрявцева. – С.-П.: Химгазкомплект, - 2009. – 264 с.

20. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* [Электронный ресурс]: утв. Приказом Мин. Регион. Разв. Рос. Федерации от 30

июня 2012 г. N 275. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

21. СП 156.13130.2014. Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: Приказ МЧС России от 5 мая 2014 года № 221 Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

22. СП 62.13330.2011 Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002 [Электронный ресурс]: Утв. Приказом Мин.Регион.Развития . Рос. Федерации от 27 декабря 2010 года № 780 (в ред. утв. Приказом Минрегиона России от 10.12.2012 № 81/ГС). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

23. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 4 июля 2008 г.: одобр. Советом Федерации Собр. Рос. Федерации 11 июля 2008 г. (в ред. Федер. законов от 10.07.2012 N 117-ФЗ, от 02.07.2013 N 185-ФЗ, от 23.06.2014 № 160-ФЗ, от 13.07.2015 № 234-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

24. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива» [Электронный ресурс]: Приказ Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2014 года № 559. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

25. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением» [Электронный ресурс]: Приказ Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 марта 2014



года № 116. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

26. Шевцов С.А. Пожарная безопасность объектов, связанных с обращением горючих газов [Текст]: Учебное пособие / С.А. Шевцов, Д.В. Каргашилов, А.Н. Шуткин, Е.В. Романюк, Л.П. Вогман. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга». – 2017. -189 с.

27. Шевцов С.А., Каргашилов Д.В., Быков И.А. Анализ пожарной опасности автономной системы газознергоснабжения по расчетной величине индивидуального пожарного риска [Текст] // Сборник по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». 2016 г. - Воронеж. Воронежский институт ГПС МЧС России С. 219-221.

28. Шевцов С.А., Каргашилов Д.В., Хабибов М.У. Особенности проектирования резервуарных установок сжиженных углеводородных газов в системах автономного газознергоснабжения с учетом оценки пожарного риска [Текст] // Пожарная безопасность. – 2016. № 3 – С. 150-155.

*Учебное издание*

**Шевцов** Сергей Александрович  
**Каргашилов** Дмитрий Валентинович  
**Вогман** Леонид Петрович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА  
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ХРАНЕНИЯ  
СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА

Учебное пособие

Издание публикуется в авторской редакции  
и авторском наборе

Подписано в печать 29.03.2018. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 5,23. Тираж 500 экз. Заказ 82.

ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга»  
394030, г. Воронеж, ул. Средне-Московская, 32е, оф. 3  
Тел. +7 (473) 200-81-02, 200-81-04  
<http://www.n-kniga.ru>. E-mail: [zakaz@n-kniga.ru](mailto:zakaz@n-kniga.ru)

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»  
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 11б  
Тел. +7 (473) 220-57-15, 296-90-83  
<http://www.n-kniga.ru>. E-mail: [typ@n-kniga.ru](mailto:typ@n-kniga.ru)