

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра безопасности жизнедеятельности

*В.С. Мануйлов, В.М. Воронова, В.А Литвинов*

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ОБСТАНОВКИ ПРИ ПОЖАРАХ РАЗЛИТИЯ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 280700 Техносферная безопасность

Оренбург  
2012

УДК 614.841 (076)  
ББК 68.9297  
М 22

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В.А.Солопова

**Мануйлов, В.С.**

М 22 Прогнозирование и оценка обстановки при пожарах разлития: методические указания / В.С. Мануйлов, В.М. Воронова, В.А. Литвинов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2012. – 38 с.

В методических указаниях представлены основы расчета риска поражения населения при чрезвычайной ситуации связанной с пожаром разлития. Приведена краткая теоретическая часть, позволяющая студенту самостоятельно освоить данный вопрос, представлены методика расчета и пример решения задачи по прогнозированию.

Методические указания предназначены для студентов всех видов и форм обучения включая бакалавров, изучающих курс безопасность в чрезвычайных ситуациях и могут быть использованы для курсового проектирования.

УДК 614.841 (076)  
ББК 68.9297

© Мануйлов В.С.,  
Воронова В.М.,  
Литвинов В.А. 2012  
© ОГУ, 2012

## Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения о пожарах разлития.....	5
2 Поражающие факторы пожара.....	9
3 Прогнозирование и оценка обстановки при ЧС на взрыво- пожароопасных объектах.....	14
3.1 Определение возможных сценариев возникновения и развития аварий.....	16
3.2 Методика расчета размеров зоны действия поражающих факторов при пожаре разлития .....	17
4 Пример решения задачи по расчету размеров зоны действия поражающих факторов при пожаре разлития.....	22
5 Порядок выполнения самостоятельной работы.....	25
6 Вопросы для самоконтроля.....	26
Список использованных источников.....	28
Приложение А.....	30
Приложение Б.....	32
Приложение В.....	33
Приложение Г.....	34
Приложение Д.....	35
Приложение Е.....	37
Приложение Ж.....	38

## Введение

На территории Российской Федерации на сегодняшний день одновременно транспортируются, хранятся и перерабатываются миллионы тонн нефти и нефтепродуктов.

Резервуарный парк России общим объемом около 22,5 млн. м<sup>3</sup> включает свыше 20000 крупных резервуаров. Объем крупнейших из них достигает 100000 м<sup>3</sup>, в мировой практике применяются резервуары объемом до 240000 м<sup>3</sup>. При эксплуатации емкостных сооружений, трубопроводов и различных видов транспортных средств возможно возникновение разливов жидкости.

За последние 20 лет произошло свыше 200 крупных пожаров на объектах хранения и переработки нефти, из них 92 % - в наземных резервуарах, в т.ч. 26 % - с сырой нефтью, 49 % - с бензином, 24 % - с мазутом, дизельным топливом, керосином [2].

Учитывая, что в России 38,4 % нефтебаз расположены в непосредственной близости от жилых или общественных зданий существует необходимость защиты населения от чрезвычайных ситуаций связанных с пожарами и взрывами на объектах нефтяного комплекса.

## **1 Общие сведения о пожарах разлития**

Пожар разлития представляет собой разлитие воспламеняющейся жидкости, горящее устойчивым диффузионным пламенем. Такой пожар возникает при нарушении целостности и истечении жидкости низкой вязкости из технологических установок. Пожары разлития наиболее характерны для товарно–сырьевых парков объектов нефтепереработки и нефтехимии.

Склады нефти и нефтепродуктов в зависимости от вместимости резервуарных парков и вместимости отдельных резервуаров, согласно СНиП 2.11.03-93, делятся на несколько категорий (приложение В).

По назначению резервуарные парки могут быть подразделены на следующие виды:

- товарно-сырьевые базы для хранения нефти и нефтепродуктов;
- резервуарные парки перекачивающих станций нефте- и нефтепродуктопроводов;
- резервуарные парки хранения нефтепродуктов различных объектов.

Общий вид резервуара для хранения нефтепродуктов представлен на рисунке 1.

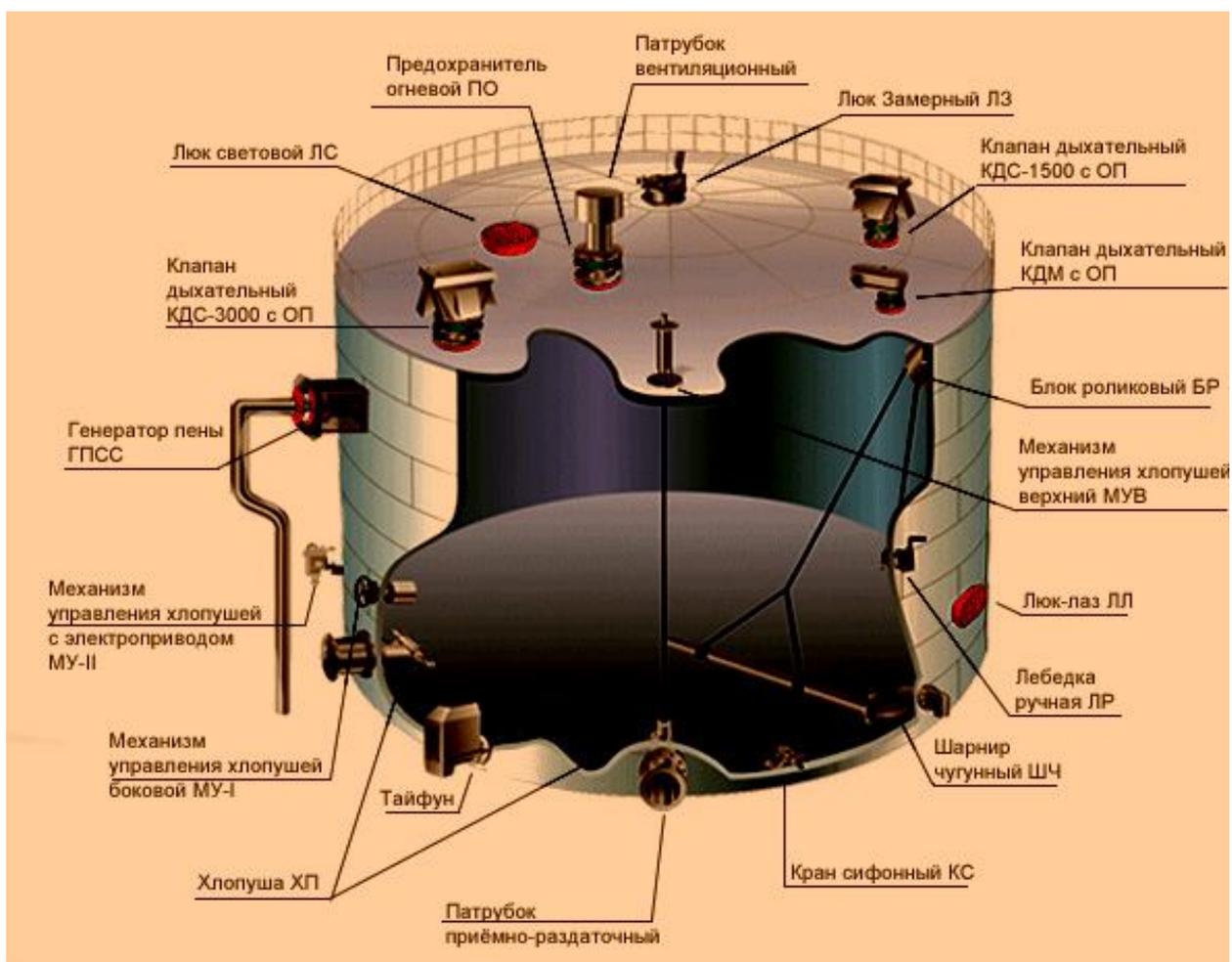


Рисунок 1 – Общий вид резервуара для хранения нефтепродуктов

Условиями для возникновения пожара в обваловании резервуаров являются: перелив хранимого продукта, нарушение герметичности резервуара, задвижек, фланцевых соединений, наличие пропитанной нефтепродуктом теплоизоляции на трубопроводах и резервуарах.

Дальнейшее развитие пожара зависит от места его возникновения, размеров начального очага горения, устойчивости конструкций резервуара, климатических и метеорологических условий, оперативности действий персонала объекта, работы систем противопожарной защиты, времени прибытия пожарных подразделений и других факторов.

Пожар в резервуаре в большинстве случаев начинается со взрыва паровоздушной смеси. На образование взрывоопасных концентраций внутри

резервуаров оказывают существенное влияние физико-химические свойства хранимых нефти и нефтепродуктов, конструкция резервуара, технологические режимы эксплуатации, а также климатические и метеорологические условия. Взрыв в резервуаре приводит к подрыву (реже срыву) крыши с последующим горением на всей поверхности горючей жидкости. При этом даже в начальной стадии, горение нефти и нефтепродуктов в резервуаре может сопровождаться мощным тепловым излучением в окружающую среду, а высота светящейся части пламени составлять 1 – 2 диаметра горящего резервуара. Отклонение факела пламени от вертикальной оси при скорости ветра около 4 м/с, составляет 60 – 70°.

После 10 – 15 мин воздействия пламени происходит потеря несущей способности маршевых лестниц, выход из строя узлов управления коренными задвижками и хлопушами, разгерметизация фланцевых соединений, нарушение целостности конструкции резервуара, возможен взрыв в резервуаре.

Горение нефти и нефтепродуктов в резервуарах может сопровождаться вскипанием и выбросами. Вскипание горючей жидкости происходит из-за наличия в ней взвешенной воды, которая при прогреве горячей жидкости выше 100 °С испаряется, вызывая вспенивание нефти или нефтепродукта. Вскипание может произойти примерно через 60 мин горения при содержании влаги в нефти (нефтепродукте) более 0,3 %. Вскипание также может произойти в начальный период пенной атаки при подаче пены на поверхность горючей жидкости с температурой кипения выше 100 °С. Этот процесс характеризуется бурным горением вспенившейся массы продукта.

Выброс нефти и темных нефтепродуктов из горящего резервуара происходит при достижении поверхности слоя донной (подтоварной) воды прогретым слоем горючей жидкости. Этот слой, соприкасаясь с водой, нагревает ее до температуры значительно большей, чем температура кипения. При этом происходит бурное вскипание воды с выделением

большого количества пара, который выбрасывает находящуюся над слоем воды горящую жидкость за пределы резервуара.

Устойчивость горящего резервуара зависит от организации действий по его охлаждению. При отсутствии охлаждения горящего резервуара в течение 5 – 15 мин стенка резервуара деформируется до уровня разлива горючей жидкости.

Сведения по частотам реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий, частотам утечек и частотам возникновения пожаров приведены в приложении Д.

Пожары резервуаров хранения нефтепродуктов подразделяются на следующие уровни:

- первый (А) — возникновение и развитие пожара в одном резервуаре без влияния на соседние;
- второй (Б) — распространение пожара в пределах одной группы;
- третий (В) — развитие пожара с возможным разрушением горящего и соседних с ним резервуаров, переходом его на соседние группы резервуаров и за пределы резервуарного парка.

При пожарах разлива образуются зоны горения, теплового воздействия и загазованности (рисунок 2). Определения этих и других терминов приведены в приложении А.

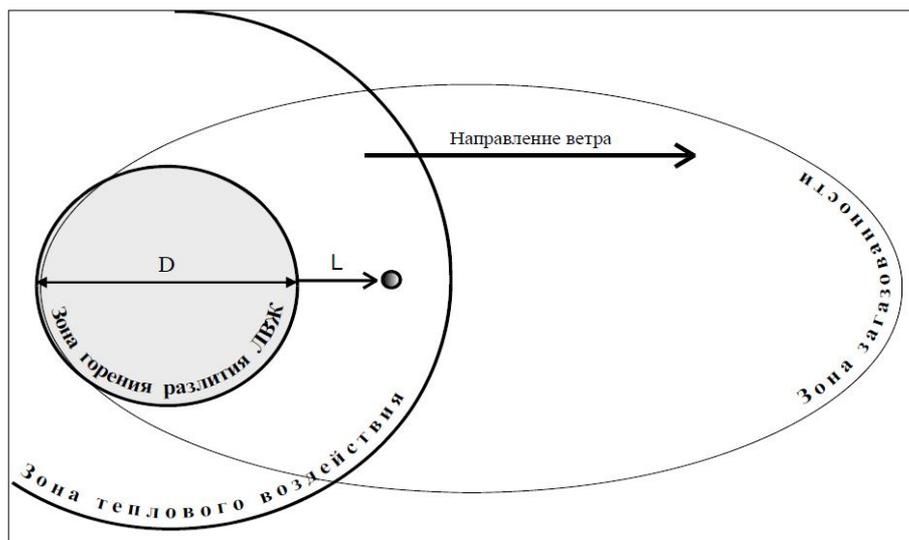


Рисунок 2 – Зоны теплового воздействия и загазованности при пожаре разлива

## 2 Поражающие факторы пожара

К поражающим факторам пожара можно отнести следующие:

- нагрев тепловым потоком;
- отравление оксидом углерода и другими продуктами горения;
- взрыв гремучей смеси оксида углерода с кислородом воздуха;
- паника;
- падение горящих конструкций, образование провалов и пр..

*Нагрев тепловым потоком* выражается в ожогах открытых частей тела, легких и дыхательных путей, а так же тепловых ударах, которые субъективно выражаются головной болью, рвотой, потерей сознания.

При анализе воздействия теплового излучения следует различать случаи импульсного и длительного воздействия. В первом случае критерием поражения является доза излучения  $D$  (например, воздействие огненного

шара), во втором - критическая интенсивность теплового излучения  $q_{CR}$  (например, воздействие пожара пролива).

Величина теплового потока (пожарная нагрузка) — количество тепловой энергии на единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению ее распространения.

Единицы измерения теплового потока: джоуль на квадратный метр ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ), калория на квадратный сантиметр ( $\text{кал}/\text{см}^2$ ).  $1 \text{ кал}/\text{см}^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{м}^2 = 40 \text{ кДж}/\text{м}^2$ . Единица измерения интенсивности теплового потока – ватт на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ ,  $1000 \text{ Дж} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{с}$ .

Термическое воздействие на человека связано с перегревом и последующими биохимическими изменениями верхних слоев кожи. Человек ощущает сильную (едва переносимую) боль, когда температура верхнего слоя покрова ( $\approx 0,1 \text{ мм}$ ) повышается до  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  [1]. Время достижения «порога боли»  $\tau$ , с, связано с плотностью теплового потока  $q$ ,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ , соотношением

$$\tau = (35/q)^{1,33}. \quad (1)$$

При плотности теплового потока менее  $1,7 \text{ кВт}/\text{м}^2$  боль не ощущается даже при длительном тепловом воздействии [9].

Степень термического воздействия зависит от величины теплового потока и длительного теплового излучения (таблица 1).

Таблица 1 – Критерии поражения тепловым излучением

Степень поражения	Интенсивность теплового излучения, кВт/м <sup>2</sup>
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20-30 с Ожог 1-й степени через 15-20 с Ожог 2-й степени через 30-40 с Воспламенение хлопка-волокна через 15 мин	7,0
Непереносимая боль через 3—5 с Ожог 1-й степени через 6—8 с Ожог 2-й степени через 12—16 с	10,5

В качестве вероятностного критерия поражения используется понятие пробит-функции. В общем случае пробит-функция  $Pr$  описывается формулой:

$$Pr = a + b \cdot \ln S, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  - константы, зависящие от степени поражения и вида объекта;  $S$  - интенсивность воздействующего фактора [1].

Для случая летального исхода формула (2) имеет вид (10). Соотношения между величиной  $Pr$  и условной вероятностью поражения человека приведено в приложении Б.

Опасность термического воздействия на строительные конструкции связана со значительным снижением их строительной прочности при превышении определенной температуры.

Степень устойчивости сооружения к тепловому воздействию зависит от предела огнестойкости конструкции, характеризуемого временем, по истечении которого происходит потеря несущей способности. Определение термина «огнестойкость» приведено в приложении А.

Прочность материалов может быть охарактеризована так называемой критической температурой прогрева, которая для стальных балок, ферм и перегонов составляет от 470 °С до 500 °С, для металлических сварных и жестко заземленных конструкций от 300 °С до 350 °С [1].

Зависимость времени воспламенения в общем случае имеет вид (3) и для различных материалов зависит от величины плотности теплового потока:

$$\tau = A/(q - q_{кр})^n, \quad (3)$$

где  $A$  и  $n$  – константы для конкретного вещества (например для древесины  $A = 4360$ ,  $n = 1,61$ ).

Особенно опасен нагрев резервуаров (емкостей) с нефтепродуктами, который может привести к взрыву сосуда. В зависимости от длительности облучения критическая плотность теплового потока для емкостей с нефтепродуктами (температура воспламенения  $\leq 235$  °С) может значительно меняться [1] (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость критического значения плотности теплового потока от длительности воздействия

Длительность воздействия, мин	Критическое значение плотности теплового потока $q_{кр}$ , кВт/м <sup>2</sup>
5	34,9
10	27,6
15	24,8
20	21,4
29	19,9
> 30	19,5

### *Отравление оксидом углерода и другими продуктами горения.*

Задымление, помутнение воздуха, угарный газ и опасные дымы вызывают отравление людей угарным газом и другими токсичными веществами, потерю ориентации в зоне пожара. Критическая температура для человека, находящегося в зоне задымления от 60 °С до 70 °С.

Единицы измерения их концентраций продуктов сгорания в воздухе: миллиграммы на литры (мг/л) и миллиграммы на куб. метры (мг/м<sup>3</sup>).

Оксид углерода и целый ряд химически опасных веществ образуются при пожаре в результате сгорания естественных и синтетических материалов. Их высокие концентрации дают до 70 % смертельных случаев, возникающих в результате этой ЧС. Так например, смертельные отравления оксидом углерода могут наступить при вдыхании его в концентрации 3 мг/м<sup>3</sup> в течение 30 — 60 мин. и при концентрации 6 мг/м<sup>3</sup>, в течение 5 — 10 мин [10] (таблица 3).

Таблица 3 - Удельный выброс вредных веществ при горении нефти и нефтепродуктов

Загрязняющий атмосферный компонент	Химическая формула	Удельный выброс вредного вещества кг/кг		
		Нефть	Диз. топливо	Бензин
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	1,0000	1,0000	1,0000
Оксид углерода	CO	0,0840	0,0071	0,3110
Сажа	C	0,1700	0,0129	0,0015
Оксиды азота (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	NO <sub>2</sub>	0,0069	0,0261	0,0151
Сероводород	H <sub>2</sub> S	0,0010	0,0010	0,0010
Оксиды серы (в пересчете на SO <sub>2</sub> )	SO <sub>2</sub>	0,0278	0,0047	0,0012
Синильная кислота	HCN	0,0010	0,0010	0,0010
Формальдегид	HCHO	0,0010	0,0011	0,0005
Органические кислоты (в пересчете на CH <sub>3</sub> COOH)	CH <sub>3</sub> COOH	0,0150	0,0036	0,0005

*Взрыв гремучей смеси оксида углерода с кислородом воздуха* создает мощную взрывную ударную волну и вызывает стремительное распространение пожара.

*Паника* — вызывает необдуманные поступки людей, приводящие к дальнейшей дестабилизации обстановки, развитию аварийных ситуаций, а так же паника может привести к увечьям или смерти (выбрасывание из окон, давка и.т.д.).

*Падение горящих конструкций, образование провалов и пр.* приводят к гибели, ожогам и увечьям.

### **3 Прогнозирование и оценка обстановки при ЧС на взрывопожароопасных объектах**

Пожарная безопасность регламентируется законодательно на уровне государственного управления. Правовой основой технического регулирования в области пожарной безопасности являются: Федеральный закон "О пожарной безопасности", Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", и др., в соответствии с которыми разрабатываются и принимаются нормативные правовые акты, регулирующие вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" содержит требования анализа пожарной опасности производственного объекта и расчета пожарного риска.

Оценка пожарного риска на производственном объекте должна предусматривать [10]:

- 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.

Расчеты по оценке пожарного риска являются составной частью декларации пожарной безопасности, которая представляется собственником объекта защиты в органы государственного контроля.

Прогнозирование и оценка обстановки при чрезвычайных ситуациях проводятся для заблаговременного принятия мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций, смягчению их последствий, определению сил и средств, необходимых для ликвидации последствий аварий, катастроф и стихийных бедствий.

Математическое прогнозирование последствий аварий, связанных с пожарами имеет огромное значение, так как дает возможность оценить потери при авариях, связанных с пожарами.

Законодательной базой для прогнозирования и оценки обстановки при ЧС на взрывопожароопасных объектах являются так же Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116, в котором имеются ссылки на утвержденные в соответствующем порядке методики расчета риска - Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», РД 03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов», и т.д.

### 3.1 Определение возможных сценариев возникновения и развития аварий

Оценка последствий воздействия опасных факторов пожара, взрыва на людей для различных сценариев их развития осуществляется на основе сопоставления информации о моделировании динамики опасных факторов пожара на территории объекта и прилегающей к нему территории и информации о критических для жизни и здоровья людей значениях опасных факторов пожара, взрыва. Для этого используются критерии поражения людей опасными факторами пожара (таблица 1).

Для определения возможных сценариев возникновения и развития пожаров рекомендуется использовать метод логических деревьев событий, пример которого представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 - Дерево событий аварий на установке первичной переработки нефти

Сценарий возникновения и развития пожароопасной ситуации на логическом дереве отражается в виде последовательности событий от исходного до конечного события.

При построении логического дерева событий используются:

- a) условная вероятность реализации различных ветвей логического дерева событий и перехода пожароопасной ситуации или пожара на ту или иную стадию развития;
- b) вероятность эффективного срабатывания соответствующих средств предотвращения или локализации пожароопасной ситуации или пожара (принимается исходя из статистических данных);
- c) вероятность поражения расположенного в зоне пожара технологического оборудования и зданий объекта в результате воздействия на них опасных факторов пожара, взрыва.

Для оценки последствий воздействия опасных факторов пожара разлива на людей, обратимся к методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

### **3.2 Методика расчета размеров зоны действия поражающих факторов при пожаре разлива**

При нарушении герметичности сосуда, содержащего сжиженный горючий газ или жидкость, часть (или вся) жидкости может заполнить поддон или обвалку, растечься по поверхности грунта или заполнить какую либо естественную впадину [1].

Если поддон или обваловка имеют вертикальный внутренний откос, то глубину заполнения  $h$  (м) можно найти по формуле:

$$h = m_{ж} / (p_{ж} F_{под}), \quad (4)$$

где  $m_{ж}$ ,  $p_{ж}$  - масса и плотность разлившейся жидкости, кг, кг/м<sup>3</sup>;

$F_{под}$  - площадь поддона кг/м<sup>3</sup>.

При авариях в системах, не имеющих защитных ограждений, происходит растекание жидкости по грунту и (или) заполнение естественных впадин.

Обычно при растекании на грунт площадь разрыва ограничена естественными и искусственно созданными границами (дороги, дренажные канавы и т.п.), а если такая информация отсутствует, то принимается толщина разлившегося слоя, равной  $h = 0,05$  м, и определяют площадь разлива  $F_{раз}$ , м<sup>2</sup> по формуле

$$F_{раз} = m_{ж} / (h p_{ж}). \quad (5)$$

Отличительной чертой пожаров разлития является «накрытие» (рисунок 3) с подветренной стороны, которое может составлять от 25 % до 50 % диаметра обвалования ( $D = \sqrt{4F_{обв} / \pi}$ ).

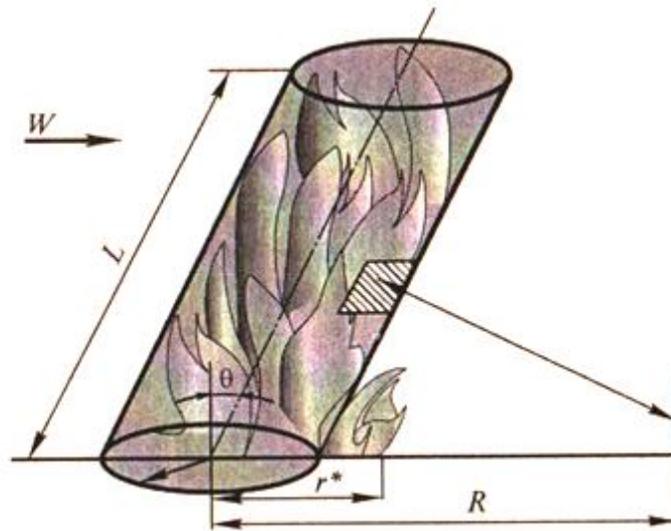


Рисунок 4 - Расчетная схема пожара разлития

Пламя пожара разлития при расчете представляется в виде наклоненного по направлению ветра цилиндра конечного размера (рисунок 4), причем угол наклона  $\theta$  зависит от безразмерной скорости ветра  $W_g$ :

$$\cos\theta = 0,75(W_g)^{-0.49} \quad (6)$$

Геометрические показатели факела пожара разлития находятся по формуле Томаса:

$$\frac{L}{D} = a \left( \frac{m_{\text{вылг}}}{\rho_g \sqrt{gD}} \right)^b \times W_g^c, \quad (7)$$

где  $W_g = W(m_{\text{вылг}} \times gD / \rho_n)^{-1/3}$  - безразмерная скорость ветра;

$m_{\text{вылг}}$  - массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>3</sup>с);

$\rho_n$  - плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_g$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$D$  - диаметр зеркала разлива, м;

$w$  - скорость ветра, м/с.

Эмпирические коэффициенты по формуле Томаса ( $a=55$ ;  $b=0,67$ ;  $c = - 0,21$ ) получены по результатам экспериментов, выполненных для широкого диапазона изменения параметров:

$$10^{-3} \leq L/D \leq 10;$$

$$10^{-6} \leq \frac{m_{\text{выг}}}{r \cdot \sqrt{gD}} \leq 10^{-2}.$$

Скорость выгорания жидкостей определяют, как правило, экспериментально. Для экспертной оценки скорости выгорания ( $m_{\text{выг}}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с)) можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$M_{\text{выг}} = C \rho_{\text{ж}} Q_p^H / L_{\text{исп}}, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_p^H$  - низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

$L_{\text{исп}}$  - скрытая теплота испарения жидкости, Дж/кг;

$C$  - коэффициент пропорциональности, значение которого, равно  $1,25 \cdot 10^{-6}$  м/с, получен путем обработки многочисленных экспериментальных данных по выгоранию большинства органических жидкостей и их смесей.

Плотность теплового потока, падающего на элементарную площадку, расположенную на уровне грунта (рисунок 4)  $q_{\text{над}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, вычисляется по формуле:

$$q_{\text{над}} = q^{\text{сод}} \varphi \cdot \exp[-7.0 \times 10^{-4} (R - r)], \quad (9)$$

где  $\varphi$  - угловой коэффициент излучения с площадки боковой поверхности

пламени пожара разлива на единичную площадку, расположенную на уровне грунта (рисунок 4), определяемый по графику на рисунке 5;  $q_{соб}$  - средняя по поверхности плотность потока собственного излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>.

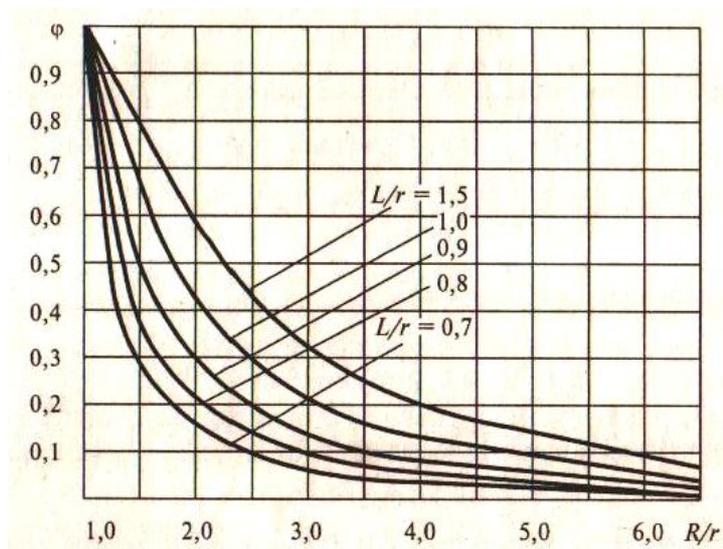


Рисунок 5 – Зависимость углового коэффициента излучения  $\phi$  цилиндрического пламени пожара разлива на элементарную площадку от  $R/r$ .

Для ориентировочных расчетов можно принять следующие значения  $q^{соб}$ : сжиженный природный газ (метан) – от 150 до 170 кВт/м<sup>2</sup>; нефть – от 60 до 80 кВт/м<sup>2</sup>; сжиженный нефтяной газ – от 50 до 60 кВт/м<sup>2</sup>; мазут – от 50 до 70 кВт/м<sup>2</sup>; бензин – от 120 до 140 кВт/м<sup>2</sup>; керосин – от 80 до 100 кВт/м<sup>2</sup>.

Вероятность смертельного поражения человека тепловым излучением  $P_{пор}$  на разных расстояниях от границы пламени можно определить из справочных данных (приложение Б), предварительно вычислив величину пробит функции по формуле (10) при  $\tau=5$  с:

$$Pr = -9,5 + 2,56 \ln(q^{1,33} \cdot \tau). \quad (10)$$

#### 4 Пример решения задачи по расчету размеров зоны действия поражающих факторов при пожаре разлития

На нефтеперекачивающей станции расположен резервуар РВС-4000 в обваловке, имеющей квадратную форму со стороной  $a=50$  м. Высота обваловки рассчитана на удержание всего объема нефти, находящейся в резервуаре, при аварийном разлитии. Фактический объем резервуара  $V_{факт} = 4000$  м<sup>3</sup>, диаметр резервуара равен  $D_{рез} = 22800$  мм., высота резервуара равна  $h_{рез} = 12000$  мм., резервуар заполнен нефтью на 80 %. Скорость ветра равна 2 м/с. Определить размеры зоны действия поражающих факторов и вероятность поражения человека тепловым излучением на разных расстояниях от границы пламени.

Решение

По условию задачи имеем: фактический объем резервуара с нефтью  $V_{факт} = 4000$  м<sup>3</sup>, резервуар заполнен нефтью на 80 %.

1 Определяем объем ЛВЖ в емкости ( $V = 0,8V_{факт}$ ):

$$V = 4000 \cdot 0,8 = 3200 \text{ м}^3.$$

По условию при полном разрушении резервуара нефть полностью заполняет обваловку имеющую квадратную форму со стороной  $a=50$  м.

Площадь обваловки равна ( $F_{обв} = a^2$ )

$$F_{обв} = 2500 \text{ м}^2.$$

2 Найдем геометрические размеры пламени пожара разлития, условно принимая в виде цилиндра модель развития пожара (рисунок 4).

Определяем диаметр зеркала разлива ( $D = \sqrt{4F_{обс} / \pi}$ ):

$$D = \sqrt{4 \cdot 2500 / 3,14} = 56,4 \text{ м.}$$

Радиус зеркала разлива  $r$  равен  $D/2 = 28,2 \text{ м}$ .

Плотность паров нефти по справочным данным  $\rho_n = 9,9 \text{ кг/м}^3$ .

Из справочных данных (приложение Е) массовая скорость выгорания нефти  $m_{выг} = 0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

(Удельная массовая скорость выгорания - это масса жидкой или твердой горючей технологической среды, сгорающей в единицу времени с единицы площади,  $\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ).

Определяем безразмерную скорость ветра по формуле (7). При этом - ускорение силы тяжести  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , плотность пара по справочным данным  $\rho_n = 9,9 \text{ кг/м}^3$ , скорость ветра  $W = 2 \text{ м/с}$ :

$$W_g = 2 \cdot (0,02 \cdot 9,8 \cdot 56,4 / 9,9)^{-1/3} = 1,92 .$$

Геометрические параметры факела пожара разлития находим по формуле Томаса (7). При этом из справочных данных принимаем константы  $a = 55$ ,  $c = -0,21$ . Высота пламени пожара разлития:

$$\frac{L}{D} = 55 \cdot \left( \frac{0,02}{1,29 \cdot \sqrt{9,8 \cdot 56,4}} \right)^{0,67} \cdot 1,92^{-0,21} = 0,37,$$

$$L = 56,5 \cdot 0,37 = 20,9 \text{ м} .$$

3 Пламя пожара разлития при расчете представляется в виде наклоненного по направлению ветра цилиндра конечного размера, косинус угла наклона пламени  $\cos \theta$  зависит от безразмерной скорости ветра  $W_{\theta}$ , найдем по формуле (6):

$$\cos \theta = 0,75 \cdot (1,92)^{-0,49} = 0,54.$$

Угол наклона  $\theta$  равен около  $60^{\circ}$ .

4 Плотность потока теплового излучения пламени пожара разлития, падающего на элементарную площадку, найдем по формуле:

Для этого определим сначала угловые коэффициенты излучения  $\varphi$  по графику на рисунке 5 для различных расстояний  $R$  от центра пламени (результаты расчетов сведены в таблицу 4), приняв линию, соответствующую  $L/r = 20,9/28,2 \approx 0,7$ .

Таблица 4 – Угловые коэффициенты излучения на различных расстояниях от границы зоны горения

$R/r$	1	2	3	4	5	6
$R, м$	28,2	56,4	84,6	112,8	141	169,2
$\varphi$	1	0,16	0,07	0,04	0,03	0,02

Затем, приняв  $q_{собр} = 60 \text{ кВт/м}^2$ , по формуле (9) найдем плотность потока теплового излучения  $q_{над}$  на разных расстояниях от границ пламени (таблица 5).

Таблица 5 - Плотность потока теплового излучения на различных расстояниях от границы зоны горения

$R, м$	28,2	56,4	84,6	112,8	141	169,2
$q_{над}, \text{ кВт/м}^2$	60	9,4	4,0	2,3	1,7	1,1

Из результатов расчетов следует, что безопасным для человека в брезентовой одежде будет расстояние  $R > 84,6$  метров, где плотность теплового потока  $q_{над}$  будет меньше  $4 \text{ кВт/м}^2$ .

5 Вероятность смертельного поражения человека тепловым излучением  $P_{пор}$  на разных расстояниях от границы пламени из справочных данных (приложение Б), предварительно вычислив величину пробит функции по формуле (10) при  $\tau=5 \text{ с}$ :

Таблица 6 - Вероятность смертельного поражения человека тепловым излучением  $P_{пор}$  на разных расстояниях от границы пламени

$R, \text{ м}$	28,2	56,4	84,6	112,8	141	169,2
$Pr$	8,56	2,10	-0,65	-2,54	-3,57	-5,05
$P_{пор}, \%$	100	0	0	0	0	0

Как видно из расчетов, на расстоянии 56,4 метров от границ пламени вероятность смертельного поражения человека тепловым излучением составит 0%.

## 5 Порядок выполнения самостоятельной работы

Подготовиться теоретически по следующим вопросам:

- 1 В чем состоит опасность эксплуатации объектов осуществляющих деятельность с нефтепродуктами?
- 2 Какие поражающие факторы имеют пожары разлития?
- 3 Каковы критерии поражения человека тепловым потоком?
- 4 Для чего производится прогнозирование и оценка обстановки при чрезвычайных ситуациях?
- 5 В чем состоит оценка пожарного риска?

6 Какие нормативно-технические и нормативно-правовые документы существуют для анализа риска возникновения аварийной ситуации на взрывопожароопасных объектах?

7 В чем состоит методика расчета размеров зоны действия поражающих факторов при пожаре разлива?

Приступить к решению задачи выданной преподавателем. При этом в соответствии с описанной методикой определить:

- 1) объем разлившейся жидкости;
- 2) площадь разлива;
- 3) геометрические размеры пожара (диаметр зеркала разлива, высоту пламени пожара, угол наклона пламени);
- 4) определить угловые коэффициенты излучения на различных расстояниях от границы зоны горения;
- 5) определить плотности потока теплового излучения на различных расстояниях от границы зоны горения;
- 6) определить безопасное расстояние от границы зоны горения;
- 7) определить вероятность смертельного поражения человека на разных расстояниях от границы зоны горения по пробит функции.

Сделать вывод по результатам расчетов.

## **6 Вопросы для самоконтроля**

- 1 Какие объекты относятся к взрывопожароопасным?
- 2 Что понимается под пожаром разлива?
- 3 Дайте определение понятиям: зона горения, зона теплового воздействия, зона загазованности.
- 4 Что понимается под плотностью теплового потока?
- 5 От чего зависят масштабы зоны теплового воздействия?

- 6 Назовите известные вам первичные средства пожаротушения.
- 7 Назовите известные вам методы тушения пожаров разлива.
- 8 Назовите известные вам методы определения возможных сценариев возникновения и развития аварий.
- 9 Для определения какой величины используют пробит функцию?
- 10 Дайте определение понятию огнестойкость.

## Список использованных источников

1. Мaстрюков, Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Б.С. Мaстрюков. – 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Издательский центр «Академия», 2006. - 336 с.
2. Решетников, А.В. Оценка поражающих факторов пожара разлития методом математического моделирования : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Решетников. – М., 2003. – 127 с.
3. Розенштейн, И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров : монография / И.М. Розенштейн. – М. : Недра, 1995. – 253 с. - ISBN 5-247-0355-8.
4. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. - М.: ГУГПС-ВНИИПО-МИПБ, 1999.
5. Лебедев, А.В. Методы оценки риска аварий на объектах хранения и переработки нефти и нефтепродуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Лебедев. – М., 1999. – 24 с.
6. Русак, О.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. / О.Н. Русак, К.Р. Малаян, Н.Г. Занько. 6-е изд., – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 448 с., ил. – (Учебники для вузов, специальная литература). – ISBN 5-8114-0284-8.
7. Российская Федерация. Законы. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федер. закон РФ от 21.12.1994 г. N 68-ФЗ // Рос. газ. – 1994. – 24 декабря.
8. О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 г. N 794 // Рос. газ. – 2004. – 20 января.
9. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при свободном горении нефти и нефтепродуктов : утв. Самарским обл.

комитетом охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ от 03.07.1996 г. : ввод в действие с 03.07.1996 г. – Режим доступа: <http://www.infosait.ru/>. – 10.07.2012.

10. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон РФ от 22 июля 2008 г. ФЗ от N 123-ФЗ // Рос. газ. – 2008 – 1 августа.

# Приложение А

(справочное)

## Термины и определения

1) **безопасная зона** - зона, в которой люди защищены от воздействия опасных факторов пожара или в которой опасные факторы пожара отсутствуют;

2) **взрыв** - быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов;

3) **взрывоопасная смесь** - смесь воздуха или окислителя с горючими газами, парами легко воспламеняющихся жидкостей, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться;

4) **огнестойкость** - это способность строительных конструкций сопротивляться воздействию пожара в течение определенного времени при сохранении эксплуатационных функций;

5) **опасные факторы пожара** - факторы пожара, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу;

6) **пожарная безопасность объекта защиты** - состояние объекта защиты, характеризующее возможность предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара;

7) **пожарная опасность объекта защиты** - состояние объекта защиты, характеризующее возможность возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара;

8) **пожарная сигнализация** - совокупность технических средств, предназначенных для обнаружения пожара, обработки, передачи в заданном

виде извещения о пожаре, специальной информации и (или) выдачи команд на включение автоматических установок пожаротушения и включение исполнительных установок систем противодымной защиты, технологического и инженерного оборудования, а также других устройств противопожарной защиты;

9) **пожарный извещатель** - техническое средство, предназначенное для формирования сигнала о пожаре;

10) **пожарный оповещатель** - техническое средство, предназначенное для оповещения людей о пожаре;

11) **пожароопасная (взрывоопасная) зона** - 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);

12) **противопожарный разрыв (противопожарное расстояние)** - нормированное расстояние между зданиями, строениями и (или) сооружениями, устанавливаемое для предотвращения распространения пожара;

13) **система противопожарной защиты** - 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);

14) **устойчивость объекта защиты при пожаре** - свойство объекта защиты сохранять конструктивную целостность и (или) функциональное назначение при воздействии опасных факторов пожара и вторичных проявлений опасных факторов пожара.

## Приложение Б

(справочное)

### Значения условной вероятности поражения человека в зависимости от пробит функции

Таблица Б.1

Условная вероятность поражения, %	Величина пробит-функции $Pr$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

## Приложение В

(справочное)

### Категории складов для хранения нефти и нефтепродуктов и противопожарные расстояния

Таблица В.1 - Категории складов для хранения нефти и нефтепродуктов

Категория склада	Максимальный объем одного резервуара, кубические метры	Общая вместимость склада, кубические метры
I	-	более 100 000
II	-	более 20 000, но не более 100 000
IIIa	не более 5000	более 10 000, но не более 20 000
IIIб	не более 2000	более 2000, но не более 10 000
IIIв	не более 700	не более 2000

Таблица В.2 - Противопожарные расстояния от зданий, сооружений и строений до складов горючих жидкостей

Вместимость склада, кубические метры	Противопожарные расстояния при степени огнестойкости зданий, сооружений и строений, метры		
	I, II	III	IV, V
Не более 100	20	25	30
Более 100, но не более 800	30	35	40
Более 800, но не более 2000	40	45	50

## Приложение Г

(справочное)

### Критические тепловые нагрузки ( $q_{кр}$ ) и времена воспламенения ( $\tau$ ) при различной плотности теплового потока

Таблица Г.1

Вещество, материал	$q_{кр}$ кВт/м <sup>2</sup>	Плотность теплового потока, $q$ , кВт/м <sup>2</sup>				
		20	50	100	150	200
Пенопласт	7,40	73,7	10,3	2,9	1,5	0,91
Хлопок—волокно	7,50	74,7	10,4	2,9	1,5	0,92
Х/б ткани	8,37	83,9	10,7	3,0	1,5	0,92
Торф кусковой	9,8	103,6	11,4	3,1	1,5	0,93
Картон серый	10,8	122,4	11,8	3,1	1,5	0,94
Картон фибровый	10,88	124,1	11,9	3,1	1,5	0,94
Темная древесина, ДСП	12,56	172,3	12,7	3,2	1,5	0,96
Бензин А-66	12,6	173,8	12,8	3,2	1,6	0,96
Древесина сосновая	12,8	181,5	12,9	3,3	1,6	0,96
Резина	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	1,02
Битумная кровля	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	1,02
Пластик слоистый	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Фанера	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Бензин А-78	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	0,98
Древесина крашенная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	0,99
Древесина обугленная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,0

## Приложение Д

(справочное)

### Сведения по частотам реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий, частотам утечек и частотам возникновения пожаров

Таблица Д.1

Наименование оборудования	Инициирующее аварийное событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год <sup>-1</sup>
1	2	3	4
Резервуары, емкости, сосуды и аппараты под давлением	Разгерметизация с последующим истечением жидкости, газа или двухфазной среды	5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
		12.5	$1,0 \cdot 10^{-5}$
		25	$6,2 \cdot 10^{-6}$
		50	$3,8 \cdot 10^{-6}$
		100	$1,7 \cdot 10^{-6}$
		Полное разрушение	$3,0 \cdot 10^{-7}$
Насосы (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением жидкости или двухфазной среды	5	$4,3 \cdot 10^{-3}$
		12.5	$6,1 \cdot 10^{-4}$
		25	$5,1 \cdot 10^{-4}$
		50	$2,0 \cdot 10^{-4}$
		Диаметр подводящего / отводящего трубопровода	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Компрессоры (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением газа	5	$1,1 \cdot 10^{-2}$
		12,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
		25	$3,9 \cdot 10^{-4}$
		50	$1,3 \cdot 10^{-4}$
		Полное разрушение	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Резервуары для хранения ЛВЖ и горючих жидкостей (далее - ГЖ) при давлении, близком к атмосферному	Разгерметизация с последующим истечением жидкости в обвалование	25	$8,5 \cdot 10^{-5}$
		100	$1,2 \cdot 10^{-5}$

	Полное разрушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$
--	-------------------	---------------------

продолжение таблицы Д.1

Наименование оборудования	Иницирующее аварию событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота Разгерметизации, год <sup>-1</sup>
1	2	3	4
Резервуары с плавающей крышей	Пожар в кольцевом зазоре по периметру резервуара	-	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	Пожар по всей поверхности резервуара	-	$9,3 \cdot 10^{-4}$
Резервуары со стационарной крышей	Пожар на дыхательной арматуре	-	$9,0 \cdot 10^{-5}$
	Пожар по всей поверхности резервуара	-	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Примечание - Здесь и далее под полным разрушением подразумевается утечка с диаметром истечения, соответствующим максимальному диаметру подводящего или отводящего трубопровода, или разрушения резервуара, емкости, сосуда или аппарата.

## Приложение Е

(справочное)

Таблица Е.1 - Теплотехнические характеристики материалов и веществ

Вещества, материалы	Массовая скорость выгорания, $V_{\text{выг}}$ , кг/(м <sup>2</sup> · с)	Теплота горения, $Q$ , кДж/кг
Ацетон	0,047	28 400
Бензол	0,08	30 500
Бензин	0,05	44 000
Керосин	0,05	43 000
Мазут	0,013	40000
Нефть	0,02	43 700
Древесина	0,015	19000
Каучук натуральный	0,013	42 000
Пиломатериалы	0,017	14000

Таблица Е.2 - Физические характеристики материалов и веществ

Наименование нефтепродукта	Плотность (при 20° С, г/см <sup>3</sup> )
Авиационный бензин	0,73-0,75
Автомобильный бензин	0,71-0,76
Топливо для реактивных двигателей	0,76-0,84
Дизельное топливо	0,83-0,93
Моторное масло	0,88-0,94
Мазут	0,92-0,99
Нефть	0,74-0,97

## Приложение Ж

(обязательное)

Таблица Ж.1- Варианты исходных данных для самостоятельного решения задач

№ варианта	Сторона обваловки, м	Радиус резервуара, м	Высота резервуара, м	Процент заполнения	Скорость ветра, м/с
1	90	22,05	11,8	90	1,0
2	100	20,00	11,0	95	2,0
3	80	20,50	12,0	80	3,0
4	70	20,61	11,5	85	1,5
5	60	22,78	11,6	70	2,5
6	50	23,00	12,1	75	3,5
7	90	22,81	11,7	95	1,0
8	100	22,00	11,2	100	1,5
9	80	21,15	11,8	90	2,0
10	70	20	10	80	3,5
11	90	21	14	100	3,0
12	60	19	12	90	1,0
13	60	22	14	80	1,5
14	70	25	12	90	2,0
15	100	21	13	100	2,5
16	70	22	14	100	2,5
17	90	26	13	80	3,0
18	80	25	10	90	3,0