

УДК 574 (082)  
ББК 20.1я43  
У 67



## УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ РИСКА

### Международный научный сборник

В сборнике освещены теоретические и практические аспекты управления промышленной и экологической безопасностью на основе риска. Особое внимание уделено методологическим и методическим вопросам расчета экологических, социальных и экономических рисков потенциально опасных объектов техносферы и другим разделам экологической экономики.

Сборник предназначен менеджерам и работникам государственной службы, а также аспирантам и студентам.

#### Редакционная коллегия:

д.т.н., профессор, академик РЭА А.И. Попов (отв. редактор),  
д.т.н., член-корр. РЭА А.М. Козлитин (зам.отв. редактора),  
д.э.н., профессор Б. Поскробко (Польша),  
д.т.н., профессор, член-корр. РЭА В.А. Хрусталев,  
к.э.н., доцент И.Б. Николаева,  
И.Г. Коптева (секретарь)

#### Одобрено

редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета,  
Президиумом СРО «Российская экологическая академия»

© СРО «Российская экологическая академия», 2005  
© ООО «Три А», 2005

ISBN 5-98002-016-0

#### Содержание

.....  
Козлитин А.М.

Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли . . . . .16

Козлитин А.М., Попов А.И., Тугушев Э.Ф. и др.

Методологические и организационные основы управления безопасностью опасных производственных объектов с использованием критериев риска . . . . . 44

.....  
Козлитин А.М., Попов А.И.

Оценка риска гидродинамических аварий на хранилищах производственных отходов химических предприятий . . . . . 63

.....  
Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. и др.

Анализ риска опасного производственного объекта «Пункт налива нефти «N» в составе проектной документации» . . . . . 101

.....  
Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.

Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов. . . . .135

© А.М. Козлитин

[www://risk-2005.narod.ru/](http://www://risk-2005.narod.ru/)

[kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

**А.М. Козлитин**

**ВЕРоятностные МЕТОды АНАЛИЗА ПОСЛЕДСТВИЙ  
ФУГАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ЧЕЛОВЕКА,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЗДАНИЯ, СООРУЖЕНИЯ  
ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ  
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Необходимым условием для принятия соответствующих управленческих решений в промышленной безопасности является количественный анализ риска аварий на опасных производственных объектах. В основу методологии анализа риска, изложенной автором в монографиях [1,2,3], положены соответствующие параметрические законы поражения реципиента, определяемые типом реализуемой опасности на рассматриваемом потенциально опасном производственном объекте и видом реципиента воздействия.

Одной из наиболее серьезных опасностей предприятий нефтегазовой отрасли является газопаровое облако, которое при определенных условиях способно взрываться. Последствия фугасного воздействия взрыва на человека и материальные объекты при аварийных ситуациях носят случайный характер и могут быть количественно оценены с привлечением вероятностных методов анализа риска. Для решения данной задачи в статье рассмотрены вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания и сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли.

Вероятности фугасного поражения реципиента определяются величиной параметра рассматриваемого поражающего фактора и принятым в расчетах параметрическим законом поражения. В качестве параметрического закона фугасного поражения реципиента нами [1,2,3] принят закон распределения Вейбулла, широко используемый в практике исследования редких (чрезвычайных) событий в природно-техногенной сфере и хорошо описывающий распределение случайных величин в широком диапазоне коэффициентов вариации.

Обоснуем выбор параметра поражающего фактора для рассматриваемого параметрического закона фугасного поражения реципиента.

Взрывы облаков газопаровоздушных смесей (ГПВС) углеводородных продуктов нефте- и газохимии являются, в отличие от «точечных» взрывов твердых взрывчатых веществ (ТВВ), *объемными*

---

\* Козлитин Анатолий Мефодьевич – доктор технических наук, член-корр. РЭА, профессор кафедры «Эргономика и безопасность жизнедеятельности» Саратовского ГТУ. [kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

взрывами. При аварийных взрывах образуется воздушная ударная волна (ВУВ), основными параметрами которой являются избыточное давление  $\Delta P_{\phi}$  (кПа) и время действия фазы сжатия  $\tau_+$  (с).

Поражающее действие ударной волны на человека и объекты при взрывах ГПВС рядом исследователей [4,5,6] описывается с использованием так называемых P-I диаграмм («*избыточное давление – импульс*»). Однако такой подход наиболее характерен для количественной оценки последствий взрывов твердых (конденсированных) взрывчатых веществ бризантного действия, при взрывах которых генерируются, так называемые, короткие ударные волны и эффект воздействия на людей и объекты определяется импульсом ударной волны I (Па·с) в ближней зоне и соотношением «избыточное давление – импульс» P-I в дальней зоне действия ВУВ.

В тоже время объемные взрывы ГПВС генерируют длинные ударные волны, и поэтому длительность воздействия ВУВ на людей и объекты значительно превышает длительность нагрузки при взрывах ТВВ более чем на порядок величины.

Данные по длительности ударной волны от взрывов паровых облаков, полученные расчетным путем и экспериментально, содержатся в работах [7,8].

Таким образом, наиболее существенным фактором при взрывах ГПВС, определяющим эффект фугасного поражения человека, а также разрушения оборудования и элементов зданий и сооружений в очаге взрыва, является избыточное давление  $\Delta P_{\phi}$  [7,9,10,11].

Рассмотрим более подробно конкретные параметрические законы поражения человека и параметрические законы разрушений технологического оборудования, зданий и сооружений при аварийных взрывах на предприятиях нефтегазовой промышленности.

### **1. Вероятностные законы фугасного поражения человека при авариях на промышленных установках**

В очаге взрыва поражение людей обусловлено как *непосредственным*, так и *косвенным* воздействием ударной волны. Данные воздействия ВУВ на человека принято характеризовать безвозвратными (смертельными) и санитарными потерями.

При непосредственном воздействии ударной волны основной причиной появления травм у людей является мгновенное повышение давления воздуха, что воспринимается человеком как резкий удар. Ввиду небольших размеров тела человека ударная волна мгновенно охватывает человека и подвергает его сильному сжатию. При этом возможны повреждения внутренних органов, разрыв легких, кровеносных сосудов, барабанных перепонок, сотрясение мозга, различ-

ные переломы и т. п. Кроме того, скоростной напор воздуха, обуславливающий метательное действие ударной волны, может отбросить человека на значительное расстояние и причинить ему при ударе о землю или твердые предметы различные повреждения.

Организм человека весьма устойчив к непосредственному воздействию избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны. В ряде литературных источников [12,13,14], основываясь на проведенных исследованиях и наблюдениях, указывается, что при избыточном давлении во фронте волны 20 - 40 кПа у человека возникают контузии и травмы легкой степени, характеризующиеся головокружением и головной болью. При избыточном давлении 40 - 100 кПа, происходит сильная контузия, повреждаются внутренние органы и возможны смертельные исходы. Характеристика степени и характера поражения людей приведена по данным [12,13,14] в табл.1.

Таблица 1

Характер поражения незащищенных людей на открытой местности

$\Delta P_{\phi}$ , кПа	Степень поражения	Характер поражения
20-40	Легкая	Легкая общая контузия организма, временное повреждение слуха, ушибы и вывихи конечностей
40-60	Средняя	Серьезные контузии, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей, сильные вывихи и переломы конечностей
60-100	Тяжелая	Сильная контузия всего организма, повреждение внутренних органов и мозга, тяжелые переломы конечностей; возможен смертельный исход
Свыше 100	Крайне тяжелая	Получаемые травмы очень часто приводят к смертельному исходу

По данным, приведенным в [5], уровни поражения людей при непосредственном воздействии избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны определяются следующими показателями, табл.2.

Таблица 2

Уровни поражения людей

Уровень поражения	$\Delta P_{\phi}$ , кПа
Безусловное смертельное поражение	$\geq 300$
Летальный исход в 50% случаев	250 ÷ 300
Порог смертельного поражения	100
Сильное поражение (сильная контузия всего организма, потеря сознания, переломы конечностей, повреждение внутренних органов)	60 ÷ 100
Среднее поражение (контузия головного мозга, повреждение органов слуха, разрыв барабанных перепонки, кровотечение из носа и ушей)	40 ÷ 60
Легкое поражение (ушибы, вывихи, временная потеря слуха, общая контузия)	20 ÷ 40
Для человека безопасно	< 10

В тоже время зарубежные исследователи дают более завышенные оценки уровней фугасного поражения людей. Так, например, по данным [7,15] уровни поражения незащищенных людей на открытой местности при непосредственном воздействии избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны от взрывов ядерных боеприпасов определяются показателями, приведенными в табл.3.

Таблица 3

Уровни поражения незащищенных людей на открытой местности

Уровень поражения	$\Delta P_{\phi}$ , кПа
Безусловное смертельное поражение	500 ÷ 800
Летальный исход, 50% случаев	350 ÷ 500
Порог смертельного поражения	200 ÷ 300
Тяжелая степень поражения легких	133 ÷ 200
Разрыв барабанных перепонок, 50% случаев	
возраст до 20 лет	200 ÷ 233
возраст свыше 20 лет	100 ÷ 133

Хотя избыточное давление  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны, возможно, и основная причина гибели незащищенных людей, находящихся в момент взрыва на открытой местности, однако для селитебных территорий в пределах очага взрыва действуют совсем другие факторы [7,16,17]:

- значительное возрастание (в 2 ÷ 8 раз) избыточного давления в отраженной ударной волне;
- обрушение жилых зданий, производственных корпусов и сооружений, разрушение несущих конструкций и обрушение перекрытий, срыв с опор и опрокидывание емкостных аппаратов и технологического оборудования, приводящее к удушью, раздавливанию или ожогу, если здание или оборудование охвачены огнем;
- косвенное воздействие ударной волны, заключающееся в поражении людей летящими обломками зданий и сооружений, камнями, кровельной черепицей, шифером, битым стеклом и другими предметами, увлекаемыми ею (наиболее опасные из всех вторичных осколков – летящие стекла, создающие в зоне с  $\Delta P_{\phi} \geq 30$  кПа осколочное поле с плотностью более 3500 оск./м<sup>2</sup>);
- метательное действие ударной волны, приводящее к перемещению тела скоростным напором и нанесению человеку при ударе о землю или препятствия травм различной степени тяжести (метательное действие скоростного напора воздуха заметно сказывается в зоне с избыточным давлением более 50 кПа, где скорость перемещения воздуха более 100 м/с, что значительно превышает скорость ураганного ветра).

Поражения людей, находящихся в момент взрыва в зданиях и сооружениях, зависит от степени их разрушения. Так, например, при полных разрушениях зданий следует ожидать 90% – 95% гибели находящихся в них людей. При сильных и средних разрушениях может выжить примерно половина людей, а остальные получают травмы различной тяжести. Многие могут оказаться под обломками конструкций, а также в помещениях с заваленными или разрушенными путями эвакуации.

Характеристика степени поражения людей для застроенной местности в пределах очага взрыва приведена по данным [16,17] в табл.4.

Таблица 4

Воздействия ударной волны на человека для застроенной местности

$\Delta P_{\text{ф}}$ , кПа	Степень поражения	Характер поражения
$\geq 190$	Крайне тяжелая	Полученные травмы с высокой вероятностью приводят к смертельному исходу. Люди, находящиеся в зоне застройки или в неукрепленных зданиях и сооружениях, погибнут в результате прямого поражения ударной волной, под развалинами зданий или вследствие удара о твердые предметы
69-76	Тяжелая	Люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, либо погибнут, либо получат серьезные повреждения при обрушении здания или в результате перемещения тела скоростным напором с возможным летальным исходом от полученных травм
55	Средняя	Люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, получают серьезные повреждения барабанных перепонок и легких под воздействием взрывной волны и поражения различной степени тяжести осколками и обломками зданий с возможным летальным исходом
24	Легкая	Обслуживающий персонал и население получают серьезные повреждения с возможным летальным исходом в результате поражения осколками технологического оборудования, развалинами здания, горящими предметами. Имеется 10%-ная вероятность разрыва барабанных перепонок
16	Незначительные травмы	Возможны временная потеря слуха или травмы, связанные с обрушением зданий, разрушением стекол и повреждением стен зданий (сколы штукатурки). Летальные исходы или серьезные повреждения от прямого воздействия ударной волны маловероятны.
5.9-8.3		С высокой надежностью гарантируется отсутствие летального исхода или серьезных повреждений. Возможны травмы, связанные с разрушением стекол и повреждением стен зданий.

В ряде литературных источников [8,18,19,20,21,22], основываясь на анализе прошлых аварий и выполненных статистических расчетах, приведены данные о вероятностях получения травм в зависимости от величины избыточного давления.

Вероятности получения баротравмы людьми, подвергшимися воздействию ударной волны различной интенсивности, приведены по данным [18] в табл.5.

Таблица 5

Вероятность получения баротравмы человеком

Избыточное давление $\Delta P_{\text{ф}}$ , кПа	400	120	65	35	13	10
Вероятность получения баротравмы	1	0,75	0,5	0,25	0,05	0

Вероятности безвозвратных и санитарных потерь в пределах очага взрыва для незащищенного персонала объекта в зависимости от степени разрушений приведены по данным [20] в табл.6.

Таблица 6

Вероятность поражения незащищенного персонала объекта

Зоны разрушений	Полных разрушений	Сильных разрушений	Средних Разрушений	Слабых разрушений
Общие потери	1	0.8	0.12	0.08
Безвозвратные потери	0,7	0,55	0,08	0,05
Санитарные потери	0.3	0.25	0.04	0.03
Не поражены	0	0.2	0.88	0.92

Вероятности смертельного исхода для людей, подвергшихся воздействию ударной волны, приведены по данным [21] в табл.7.

Таблица 7

Вероятность смертельного исхода для людей в очаге взрыва

Зоны поражения	Граница зоны с избыточным давлением 60 кПа	Граница зоны с избыточным давлением 14 кПа	Граница зоны с избыточным давлением 7 кПа
Вероятность смертельного исхода	0.5	0.01	0

Вероятности поражения людей вследствие разрушения зданий ударной волной, приведены по данным [22] в табл.8.

Таблица 8

Вероятности поражения людей вследствие разрушения зданий в очаге взрыва

Потери	Вероятности поражения людей при степенях разрушения зданий			
	полной 65 ÷ 105 кПа	сильной 50 ÷ 65 кПа	средней 30 ÷ 50 кПа	слабой 10 ÷ 30 кПа
Общие	1	0.6	0.2	0.05
Безвозвратные	0.95	0.4	0.05	0
Санитарные	0.05	0.2	0.15	0.05

Вероятности гибели людей, находящихся на открытой местности, в зданиях и сооружениях, получены по данным [19] и приведены табл.9.

Таблица 9

Вероятности смертельного поражения людей

Место нахождения людей	Порог смертельного поражения 100 кПа	Вероятности смертельного поражения людей по зонам разрушений			
		Полных 70 кПа	Сильных 50 кПа	Средних 30 кПа	Слабых 10 кПа
Жилые и административные здания	0.99	0.7	0.15	0.06	0.02
Промышленные здания и сооружения	0.99	0.99	0.99	0.6	0.1
На открытой местности	0.99	0.5	0.1	0.01	0

В ряде нормативных документов и литературных источников [4, 5, 6, 17, 23, 24, 25] в качестве вероятностного критерия фугасного поражения человека используется пробит–функция, величина, которой для ударной волны описывается выражением  $Pr(Sr) = a + b \cdot \ln[Sr(\Delta P_{\phi}; l)]$ , где  $a$ ,  $b$  – константы пробит–функции,  $Sr(\Delta P_{\phi}; l)$  – интенсивность воздействующего фактора.

Однако, необходимо отметить, в указанных литературных и нормативных источниках приведены значения констант пробит–функции ( $a$  и  $b$ ) и параметра  $Sr(\Delta P_{\phi}; l)$  только для поражения незащищенных людей на открытой местности от разрыва легких и барабанных перепонок при непосредственном воздействии избыточного давления ударной волны, соответствующего уровням поражения при взрывах ядерных боеприпасов, [6] и табл.3.

В тоже время, параметры пробит–функций для вероятностной оценки поражения людей в условиях застроенной местности селитебной территории, когда в пределах очага взрыва действуют совсем другие факторы, не рассматриваются. Такой подход ограничивает возможности количественной оценки потенциального и коллективного риска фугасного поражения людей в пределах производственной и селитебной территорий при авариях на взрывоопасных объектах.

**Параметрический закон фугасного поражения.** Основываясь на анализе приведенных данных о характере воздействия избыточного давления на человека в очаге взрыва, сформировавшегося в пределах территорий жилой и промышленной застройки, в качестве параметрического закона фугасного поражения человека, нами используется трехпараметрическое распределение Вейбулла

$$F(\Delta P_{\phi}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta P_{\phi} - \Delta P_{\text{пор}}}{\eta} \right)^{\xi} \right], \quad (1)$$

где  $F(\Delta P_{\phi})$  - функция вероятностей летальных исходов в зависимости от величины избыточного давления;  $\eta$ ,  $\xi$ ,  $\Delta P_{\text{пор}}$  - параметры закона распределения Вейбулла:  $\eta$  - параметр масштаба,  $\xi$  - параметр формы,  $\Delta P_{\text{пор}}$  - параметр положения, в качестве которого нами рассматривается порог поражения индивидуума – критериальное значение избыточного давления, ниже которого вероятность фугасного поражения человека исчезающе мала.

Параметры распределения Вейбулла получены на множестве возможных значений избыточного давления для принятых граничных значений:



-  $\Delta P_{\text{пор}} = 10.0$  кПа – порог поражения – минимальное граничное избыточное давление, ниже которого вероятность фугасного поражения человека исчезающе мала.

-  $\Delta P_{100\%} = 148.0$  кПа – максимальное граничное избыточное давление, для которого вероятность смертельного поражения человека ударной волной можно считать достоверным событием.

Покажем процедуру определения численных значений параметров распределения Вейбулла  $\eta$  и  $\xi$ , используя специальные методы изложенные, например, в [26,27,28].

По объединенной выборке приведенных данных, были вычислены математическое ожидание  $M[\Delta P_{\phi}]$  и стандартное отклонение  $\sqrt{D[\Delta P_{\phi}]}$  последствий воздействия избыточного давления на человека

в очаге взрыва, а также их отношение  $v_b = \frac{\sqrt{D[\Delta P_{\phi}]}}{M[\Delta P_{\phi}]}$ . По полу-

ченному значению  $v_b$  с помощью таблиц коэффициентов распределения Вейбулла [27] был определен параметр распределения  $\xi$  и рассчитан коэффициент  $K_b = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\xi}\right)$ , где  $\Gamma(z)$  – гамма-функция Эйлера.

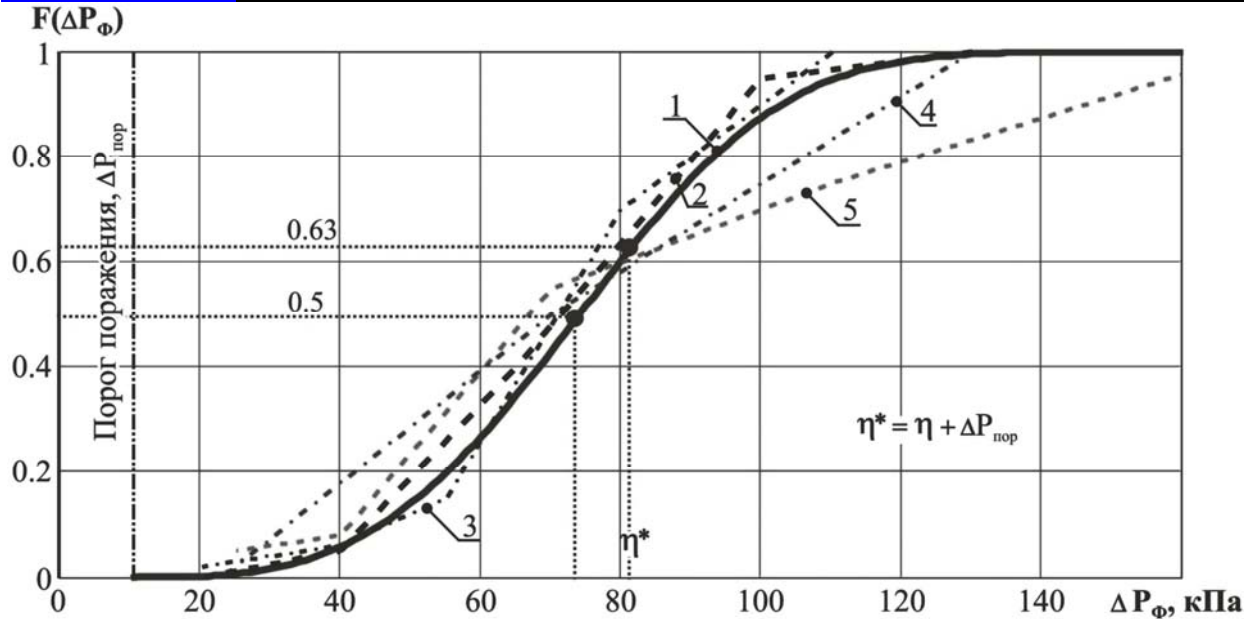
Для полученного значения  $K_b$  по формуле  $\eta = \frac{M[\Delta P_{\phi}]}{K_b}$  был рассчитан параметр распределения  $\eta$ .

Выполненная аналитическая обработка исходных данных о последствиях воздействия избыточного давления на человека в очаге взрыва дала следующие показатели:  $M[\Delta P_{\phi}] = 64.263$  кПа;  $\sqrt{D[\Delta P_{\phi}]} = 43.703$  кПа;  $v_b = 0.680$ ;  $\xi = 3.23$ ;  $K_b = 0.896$ ;  $\eta = 71.72$  кПа.

Характер изменения вероятности смертельного поражения человека в функции величины избыточного давления на фронте воздушной ударной волны для распределения Вейбулла (1) с учетом полученных значений  $\eta$ ,  $\xi$  и  $\Delta P_{\text{пор}}$ , и для эмпирико-статистических данных [19,20,21,22], показан, в качестве примера на рис.1.

Из приведенного рис.1 следует достаточно близкое совпадение эмпирико-статистического и аналитического подходов к количественной оценке последствий воздействия избыточного давления на человека в очаге взрыва.

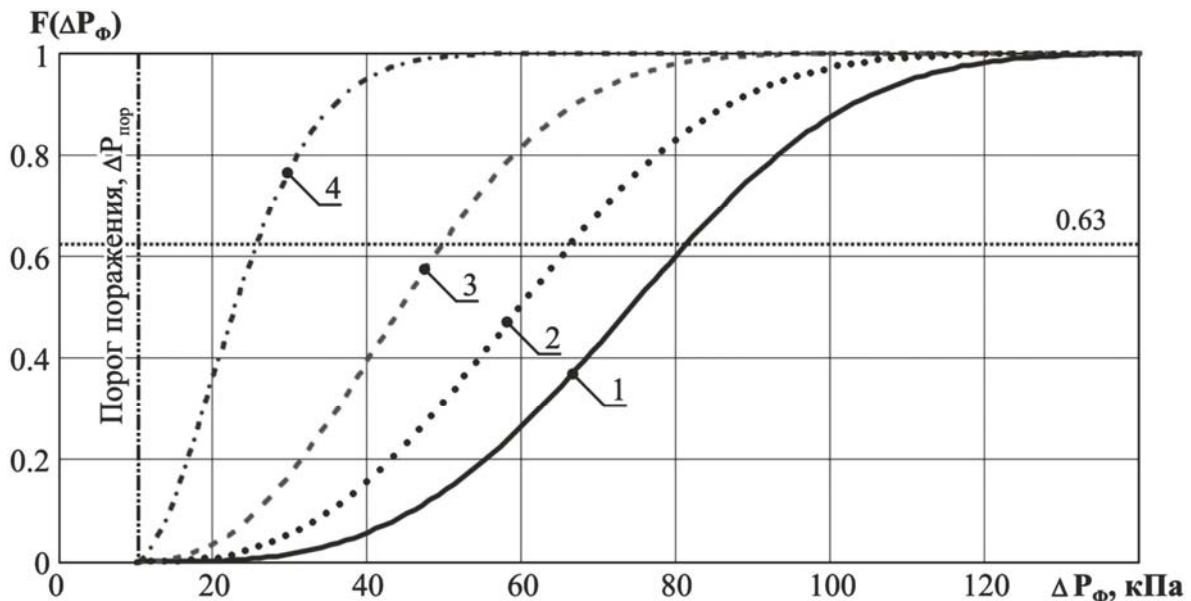
Для выполнения практических расчетов ожидаемых потерь при авариях на нефтегазохимических объектах техносферы приняты следующие категории фугасного поражения человека: *смертельный исход, тяжелая, средняя и легкая степени поражения.*



1 - функция распределения Вейбулла; 2 - распределение вероятностей табл.6 [20]; 3 - распределение вероятностей табл.7 [21]; 4 - распределение вероятностей табл.8 [22]; 5 - распределение вероятностей табл.9 [19]

Рис.1. Функции распределения вероятностей смертельного поражения людей при фугасном воздействии ударной волны

Покажем характер изменения вероятности поражения человека в функции величины избыточного давления на фронте воздушной ударной волны для рассматриваемых категорий k-й степени тяжести фугасного поражения человека, выполнив расчеты по формуле (1), с учетом полученных значений  $\eta$ ,  $\xi$  и  $\Delta P_{\text{пор}}$ . Полученные результаты приведены, в качестве примера, на рис.2.



1 - летальный исход; 2 - тяжелые поражения; 3 - поражения средней тяжести; 4 - легкие поражения  
 Рис. 2. Распределение Вейбулла для оценки вероятности фугасного поражения

**Координатный закон фугасного поражения.** Для перехода от параметрического закона поражения человека  $F(\Delta P_{\text{ф}})$  к координатному  $F(\Gamma)$  используем метод, изложенный в [1,2], с привлечением методик прогнозирования последствий аварийных взрывов, например, [4], [10] или [14,29], позволяющих установить функциональную связь расстояния  $\Gamma$  от источника опасности до рассматриваемой элементарной площадки территории с  $ij$ -координатами и случайной величины избыточного давления  $\Delta P_{\text{ф}}$  в пределах этой площадки. На этой основе находится функциональная зависимость  $\Gamma = \Gamma(\Delta P_{\text{ф}})$  и обратная ей функция  $\Delta P_{\text{ф}} = \Delta P(\Gamma)$ .

Используя полученные функциональные зависимости, определим координатный закон фугасного поражения человека  $F(\Gamma)$  для очага взрыва, внешняя граница которого проходит через точки на местности с избыточным давлением  $\Delta P_{\text{пор}}$

$$F(\Gamma) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Delta P_{\text{max}}}{\eta}\right)^{\xi}\right] & \text{при } 0 < \Gamma \leq r_{\text{обл}} \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Delta P(\Gamma) - \Delta P_{\text{пор}}}{\eta}\right)^{\xi}\right] & \text{при } r_{\text{обл}} < \Gamma \leq \Gamma(\Delta P_{\text{пор}}) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{max}}$  – максимальное избыточное давление на фронте волны;  $r_{\text{обл}}$  – радиус облака ГПВС.

Согласно многочисленным экспериментам, а также материалам исследований промышленных аварий [10,24,30,31], в эволюционирующем по направлению ветра облаке ГПВС в «открытых», неограниченных пространствах, даже при их сильных «загромождениях», режим горения при дефлаграционных взрывах протекает со скоростью, не превышающей околосзвуковую ( $\approx 250 \div 320$  м/с), без эффекта разгона фронта пламени и последующего перехода к детонации.

Как следствие, максимальное избыточное давление  $\Delta P_{\text{max}}$  в очаге взрыва не превышает верхнего критерияльного давления для принятого параметрического закона фугасного поражения  $\Delta P_{100\%} = 140$  кПа и может изменяться в широких пределах от 15 кПа до 140 кПа, в зависимости от вида вещества и степени загроможденности пространства. В этой связи, для координатных законов фугасного поражения человека, вероятности летального исхода даже в пределах быстро сгорающего газопарового облака (дефлаграция) могут оказаться значительно меньше единицы, рис. 3.

Данная особенность координатных законов фугасного поражения человека существенно отличает их от координатных законов токсиче-

ского поражения [1,2], для которых вероятности поражения человека в ближней зоне очага химического заражения всегда равны единице. Это объясняется тем, что концентрация ядовитых паров, в эволюционирующим по направлению ветра облаке, последовательно изменяется от летальных значений в ближней зоне до пороговых значений в дальней зоне.

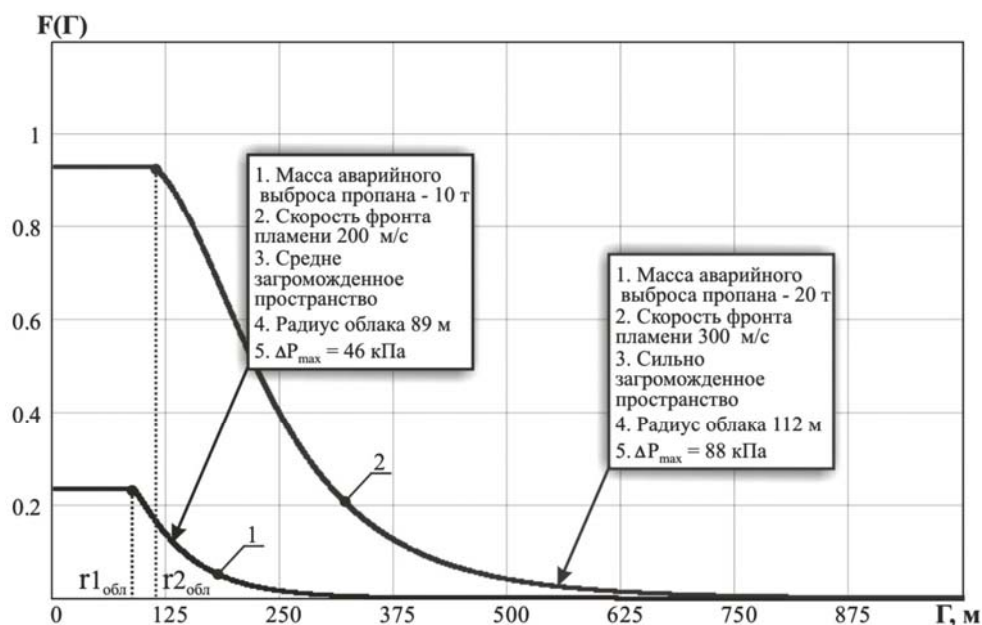


Рис. 3. Координатные законы фугасного поражения человека

Поражение человека ударной волной взрыва, в соответствии с принятой нами методологией квантификации техногенных рисков, возможно только в пределах круга вероятного поражения (КВП). В этой связи, так как внешняя граница КВП определяется критериальным значением избыточного давления  $\Delta P_{пор}$ , ниже которого вероятность фугасного поражения человека исчезающе мала, данная величина введена нами в трехпараметрическое распределение Вейбулла в качестве заданного параметра.

На рис.4, для иллюстрации сказанного, приведены результаты расчетов распределения вероятностей летальных исходов вследствие фугасного поражения человека на прилегающей к объекту территории (координатные законы поражения), при аварии с выбросом сжиженного пропана на реальном предприятии органического синтеза.

Из сравнительного анализа координатных законов, представленных на рис.4 можно видеть, что функция вероятностей *летальных исходов*  $F(\Gamma)$ , учитывающая параметр порогового воздействия  $\Delta P_{пор}$ , стремится к нулю, при асимптотическом приближении к внешней границе КВП. В другом случае, при  $\Delta P_{пор} = 0$ , вероятность *летальных исходов*, в результате фугасного воздействия ударной волны остается

значимой и за пределами КВП, что приводит, как уже отмечалось выше, к необоснованному завышению уровня опасности объекта.

В отечественную практику управления промышленной безопасностью многими исследователями [5,6,17,24,25] и разработчиками нормативных документов [4,23] для расчета вероятности поражения реципиентов риска широко внедряются так называемые пробит-функции, заимствованные, согласно авторским ссылкам, из статьи С.М. Pietersen в журнале «Loss Prevention in the Process Industries» [32].

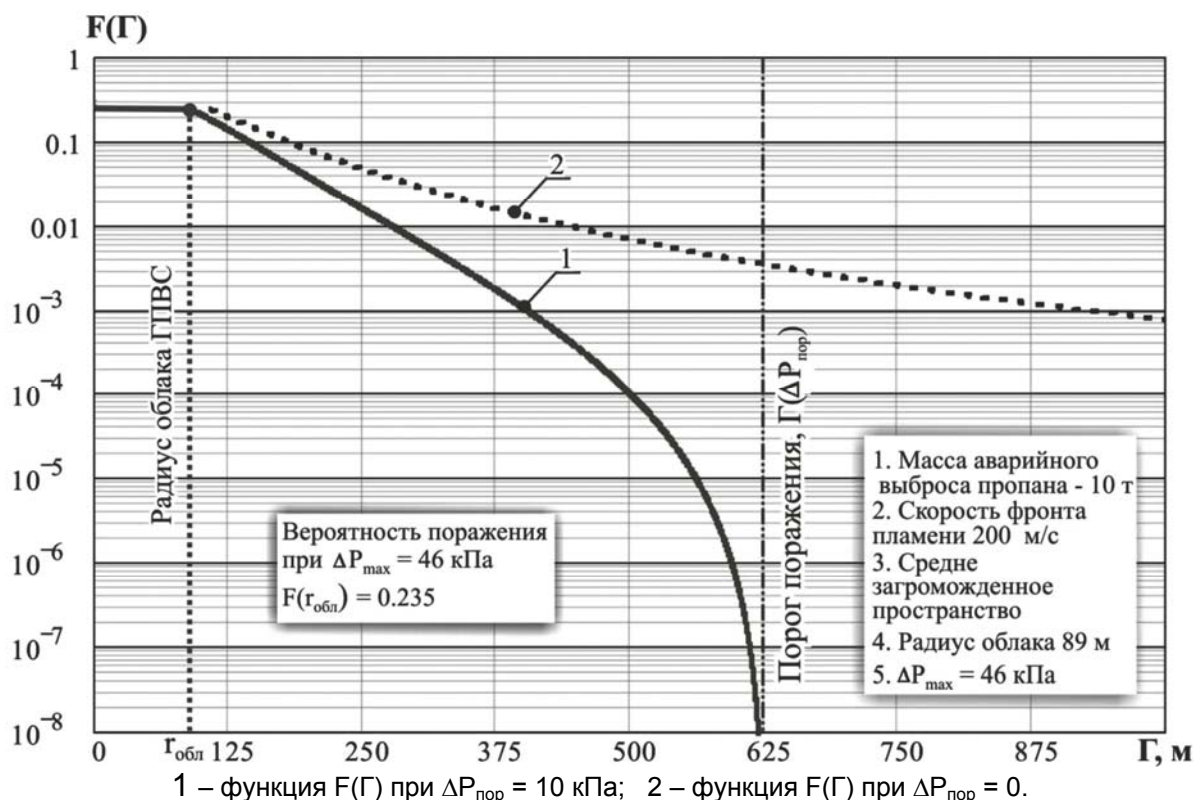


Рис.4. Координатные законы фугасного поражения человека

Пробит-функции, в интерпретации указанных авторов, представлены функционалом  $Pr(Sr) = a + b \cdot \ln[Sr(\Delta P_{ф}; l)]$ . Данные пробит-функции, отражающие связь параметров поражающего фактора  $\Delta P_{ф}$  и  $l$  и пробита относительной частоты поражения  $Pr(Sr)$ , являются верхним пределом интеграла вероятности Гаусса-Лапласа [2], аппроксимирующего закон поражения реципиента. В табл.10 приведены пробит-функции для различных законов поражения человека ударной волной, в интерпретации авторов работ [4,5,6,23,24] и из оригинальной статьи С.М. Pietersen [32].

Таблица 10

Пробит–функции поражения человека ударной волной

1) “Металлическое” поражение человека	по [4]	$Pr_1 = 5 - 2,44 \cdot \ln(Sr_1)$	$Sr_1 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P_\Phi} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{I \cdot \Delta P_\Phi}$
	по С.М. Pietersen [32] по N.A. Eisenberg [33]	$Pr_{1P} = - 46,1 + 4,82 \cdot \ln(I)$	<a href="http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm">www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm</a>
2) Летальный исход	по [5]	$Pr_2 = 5 - 2,44 \cdot \ln(Sr_2)$	$Sr_2 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P_\Phi} + \frac{1,38 \cdot 10^9}{I \cdot \Delta P_\Phi}$
3) Летальный исход	по [24]	$Pr_3 = 5 - 2,44 \cdot \ln(Sr_3)$	$Sr_3 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P_\Phi} + \frac{1,9 \cdot 10^9}{I \cdot \Delta P_\Phi}$
4) Поражение человека избыточным давлением	по [23]	$Pr_4 = 5 - 0,26 \cdot \ln(Sr_4)$	$Sr_4 = \left( \frac{17500}{\Delta P_\Phi} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I} \right)^{9,3}$
5) Потеря управляемости у людей Контузия организма человека	по [4] по [5]	$Pr_5 = 5 - 5,74 \cdot \ln(Sr_5)$	$\left\{ \begin{array}{l} Sr_5 = \frac{4,2}{1 + P_s} + \frac{1,3}{I_s} \\ P_s = \frac{\Delta P_\Phi}{P_0}; \quad I_s = \frac{I}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}} \end{array} \right.$
6) Гибель вследствие легочного кровотечения (разрыв легких)	по [6]	$Pr_6 = 5 - 5,74 \cdot \ln(Sr_6)$	$\left\{ \begin{array}{l} Sr_6 = \frac{4,2}{1 + P_s} + \frac{1,3}{I_s} \\ P_s = \frac{\Delta P_\Phi}{P_0}; \quad I_s = \frac{I}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}} \end{array} \right.$
	по С.М. Pietersen [32] по N.A. Eisenberg [33]	$Pr_{6P} = - 77,1 + 6,91 \cdot \ln(\Delta P_\Phi)$	<a href="http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm">www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm</a>
7) Разрыв барабанных перепонок у людей	по [4]	$Pr_7 = - 12,6 + 1,524 \cdot \ln(Sr_7)$	$Sr_7 = \Delta P_\Phi$
	по С.М. Pietersen [32] по N.A. Eisenberg [33]	$Pr_{7P} = - 15,6 + 1,93 \cdot \ln(\Delta P_\Phi)$	<a href="http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm">www.mtas.es/insht/ntp/ntp_291.htm</a>

Примечание:  $P_0$  - атмосферное давление, Па;  $m$  - масса человека, кг;  $\Delta P_\Phi$  - избыточное давление, Па;  $I$  - удельный импульс, Па·с.

Проведем сравнительный анализ координатных законов фугасного поражения человека, полученных на основе распределения Вейбулла (2) и пробит–функций.

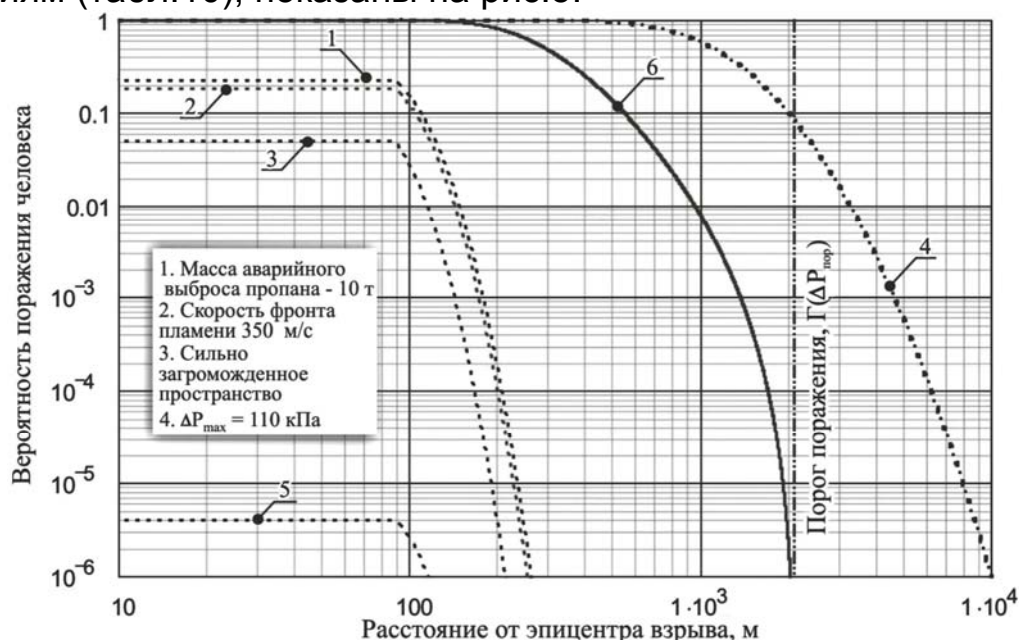
Выполненные расчеты вероятностей фугасного поражения человека для фиксированных расстояний от эпицентра взрыва с шагом дискретизации 200 м, приведены для анализируемых распределений в табл.11.

Таблица 11

Вероятности фугасного поражения человека для анализируемых распределений в функции расстояния от эпицентра взрыва

Расстояние до эпицентра взрыва, м	Избыточное давление, кПа	Значения вероятностей фугасного поражения человека для указанных распределений					
		Распределение Вейбулла, формула (2)	“Метательное” поражение человека по [4]	Летальный исход по [5]	Летальный исход по [24]	Поражение человека избыточным давлением по [23]	Контузия организма человека по [4]
89	110	0.997	0.216	0.179	0.048	1	$3.92 \times 10^{-6}$
200	76.2	0.802	$1.67 \times 10^{-4}$	$9.54 \times 10^{-5}$	$3.44 \times 10^{-6}$	0.999	$1.46 \times 10^{-9}$
400	46.9	0.245	$7.72 \times 10^{-12}$	$2.83 \times 10^{-12}$	$9.19 \times 10^{-15}$	0.978	$6.08 \times 10^{-15}$
600	33.5	0.07	0	0	0	0.889	0
800	25.9	0.022	0	0	0	0.738	0
1000	21.0	$7.5 \times 10^{-3}$	0	0	0	0.57	0
1200	17.7	$2.54 \times 10^{-3}$	0	0	0	0.418	0
1400	15.2	$8.0 \times 10^{-4}$	0	0	0	0.298	0
1600	13.4	$2.12 \times 10^{-4}$	0	0	0	0.208	0
1800	11.9	$3.75 \times 10^{-5}$	0	0	0	0.144	0
2000	10.7	$1.9 \times 10^{-6}$	0	0	0	0.099	0
2139	10.0	0	0	0	0	0.076	0

Для повышения информативности выполненных расчетов (табл.11), координатные законы фугасного поражения человека, построенные в логарифмическом масштабе по формуле (2) и пробит-функциям (табл.10), показаны на рис.5.



1 - “метательное” поражение человека ( $Pr_1$ ) по [4]; 2 - летальный исход ( $Pr_2$ ) по [5]; 3 - летальный исход ( $Pr_3$ ) по [24]; 4 - поражение человека избыточным давлением ( $Pr_4$ ) по [23]; 5 - контузия всего организма по [4], разрыв легких ( $Pr_5$ ) по [6]; 6 - распределение Вейбулла формула (2)

Рис.5. Сравнительный анализ координатных законов фугасного поражения человека

Сопоставляя полученные результаты, можно видеть, что пробит–функции  $Pr_1$ ;  $Pr_2$ ;  $Pr_3$  и  $Pr_5$ , описывающие поражения незащищенных людей на открытой местности при непосредственном воздействии избыточного давления ударной волны, могут быть использованы для вероятностной оценки только последствий взрывов ТВВ в ближней зоне, не превышающей десятки метров от центра взрыва, или взрывов ядерных боеприпасов.

При дефлаграционных взрывах облаков ГПВС в неограниченном пространстве максимальные избыточные давления не превышают  $130 \div 140$  кПа. При таких давлениях определяющими при воздействии ударной волны на человека будут совсем другие факторы – отраженные ударные волны, обрушение зданий, сооружений, оборудования, косвенное и метательное действие ударной волны. Попытка учесть данный факт, предпринята в НПБ-105-03 [23], авторы которой для вероятностной оценки поражения человека ударной волной предложили использовать пробит–функцию  $Pr_4$ , описывающую среднюю степень разрушения зданий.

Однако, при таком подходе, во-первых, учтен только один фактор – разрушение здания, а во-вторых, вероятности фугасного поражения человека, рассчитываемые по координатному закону на основе данной пробит–функции  $Pr_4$ , остаются значимыми и за пределами порога поражения человека  $\Gamma(\Delta P_{пор})$ , например,  $F[\Gamma(\Delta P_{пор} = 10 \text{ кПа})] = 0.076$  для исходных данных, приведенных на рис.5.

Выполненный сопоставительный анализ позволяет утверждать, что полученные нами законы фугасного поражения человека, аппроксимлируемые распределением Вейбулла (1) и (2), наиболее адекватны процессам воздействия ударной волны на человека в очаге дефлаграционного взрыва, сформировавшегося при авариях на взрывоопасных объектах в пределах производственной и селитебной территорий.

## ***2. Оценка последствий воздействия аварийных взрывов на промышленное оборудование, здания и сооружения***

Действие ударной волны на элементы сооружений характеризуется комплексом нагрузок: прямое давления, давления отражения, давление обтекания, давление затекания, нагрузка от сейсмозрывных волн в грунте и т.п.

При моделировании уязвимости сооружений сопротивляемость их элементов действию ударной волны принято характеризовать величиной избыточного давления во фронте ударной волны, обозначаемого  $\Delta P_{\phi}$ .



На основе анализа литературных данных [7, 11, 12, 16, 17, 34, 35, 36, 37] в качестве медианных приняты для предприятий нефтегазовой, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также жилых и общественных зданий следующие значения  $\Delta P_{\Phi}$ , кПа, на внешних границах зон разрушений, табл. 12.

Таблица 12

Характеристика зон разрушения очага взрыва

Избыточное давление	Характер разрушений
$\Delta P_{\Phi} \geq 70 \text{ кПа}$	Сильное и полное разрушение всех типов зданий. Разрушение несущих конструкций, обрушение перекрытий, уничтожение технологического оборудования. Восстановление невозможно.
$70 \text{ кПа} > \Delta P_{\Phi} \geq 50 \text{ кПа}$	Значительные деформации несущих конструкций, разрушение большей части перекрытий, стен и оборудования производственных корпусов и жилых зданий. Срыв с опор, опрокидывание, разрушение и деформация емкостных аппаратов, обрыв трубопроводов и запорной арматуры. Средние повреждения автотранспорта, переворачивание вагонов. Восстановление нецелесообразно и возможно лишь путем нового строительства с использованием сохранившихся конструкций и оборудования зданий и сооружений.
$50 \text{ кПа} > \Delta P_{\Phi} \geq 28 \text{ кПа}$	Разрушение кровли, перегородок, а также части оборудования производственных корпусов и жилых зданий. Смещение на опорах, деформация оболочек емкостных аппаратов и обвязочных трубопроводов, повреждение запорной арматуры. Восстановление возможно при капитальном ремонте.
$28 \text{ кПа} > \Delta P_{\Phi} \geq 14 \text{ кПа}$	Разрушение наименее прочных конструкций зданий, сооружений и агрегатов; заполнений дверных и оконных проемов, срыв кровли. Небольшие вмятины на оболочке емкостных аппаратов, деформация трубопроводов. Основное оборудование повреждено незначительно. Использование возможно после среднего (текущего) ремонта и замены поврежденных деталей.
$14 \text{ кПа} > \Delta P_{\Phi} \geq 5 \text{ кПа}$	Полное разрушение застекления. Частичные повреждения рам, дверей, нарушение штукатурки и внутренних мелких перегородок.

Избыточное давление  $\Delta P_{\Phi}$  используется как универсальная характеристика воздействия на элементы сооружений ударной волны и сравнивается с предельной величиной  $\Delta P_{\text{lim}}$ , определяющей степень их разрушения и повреждения. Приведем, в качестве примера, выборку некоторых значений величин  $\Delta P_{\text{lim}}$  для зданий, сооружений и оборудования различного назначения, из литературных источников [11,12,37], табл.13.

Таблица 13

Степени разрушения при воздействии ударной волны

Объекты	Разрушения, при избыточных давлениях, кПа			
	слабые	средние	сильные	полные
Здания и сооружения				
Промышленные здания с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом	20 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 100
Промышленные здания бескаркасной конструкции или легким металлическим каркасом	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 80

Промышленные здания с металлическим каркасом и бетонным заполнением с площадью остекления ≈ 30%	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Кирпичные бескаркасные производственно - вспомогательные здания с перекрытием из ж/б сборных элементов	10 - 20	20 - 35	35 - 45	45 - 60
То же, с перекрытием из деревянных элементов, одно- и многоэтажные	8 - 15	15 - 25	25 - 35	35
Складские кирпичные здания	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Административные кирпичные здания				
1 – 3 этажные	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60
4 – 6 этажные	15 - 25	25 - 35	35 - 45	45 - 55
Кирпичные малоэтажные здания (один–два этажа)	8 – 15	15 - 25	25 - 35	35 - 45
Кирпичные многоэтажные здания (три этажа и более)	8 - 12	12 - 20	20 - 30	30 - 40
Деревянные дома	6 - 8	8 - 12	12 - 20	20 - 30
Энергетические сооружения и сети				
Гибкие шланги для перекачивания нефтепродуктов	7 - 15	15 - 25	25 - 35	-
Наземные металлические резервуары и емкости	30 - 40	40 - 70	70 - 90	90
Газгольдеры и наземные хранилища ГСМ и химических веществ	15 - 20	20 - 30	30 - 40	40
Частично заглубленные резервуары для хранения нефтепродуктов	20	40	75	100
Подземные резервуары	40	75	150	200
Котельные, регуляторные станции и другие сооружения в кирпичных зданиях	7 - 13	13 - 25	25 - 35	35 - 45
Трубопроводы				
Трубопроводы наземные	20	50	130	-
Трубопроводы на металлических или ж/б эстакадах	20 - 30	30 - 40	40 - 50	-
Транспорт				
Грузовые автомобили, автоцистерны	20 - 30	30 - 55	55 - 65	90 - 130
Цистерны для перевозки по железным дорогам сжиженных газов, нефтепродуктов	30	50	70	80
Цельнометаллические вагоны крытые	30 - 40	40 - 80	80 - 100	100 - 200
Вагоны товарные деревянные	15	30	35	40
Пожарные машины	10	35	50	70

Для расчета предела устойчивости  $\Delta P_{lim}$  различного типа зданий также может быть использована следующая аналитическая зависимость [14,36]

$$\Delta P_{lim} = K_{\Pi} \cdot \frac{(H_{зд} - 2) \cdot \left[ \sqrt{(1,36 + v)^2 + v \cdot (1 - v)} - 0,36 \right] \cdot (1 + 4,65 \cdot 10^{-3} Q)}{3 + 1,29 \cdot (H_{зд} - 5)} \cdot \prod_{j=1}^n K_j, \quad (3)$$

где  $K_{\Pi}$  - коэффициент, учитывающий степень разрушения здания;  $H_{зд}$  - высота здания, м;  $K_j$  - коэффициенты, учитывающие назначение здания, тип конструкции, строительный материал, сейсмостойкость, степень износа и другие факторы;  $v$  - отношение суммарной площади проемов на фронтальной стене здания к общей площади этой стены;  $Q$  - грузоподъемность внутрицеховых мостовых кранов (кранового оборудования), т.

Как видно из табл.13 и приведенной аналитической зависимости (3) различные здания, сооружения или технологическое оборудование при одинаковом внешнем воздействии на них избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$ , имеют значительный разброс значений предельной величины  $\Delta P_{lim}$ , определяющей степень разрушения объектов. В этой связи, при количественной оценке последствий взрывов, удобно нормировать давление  $\Delta P_{\phi}$ , действующее в пределах рассматриваемого объекта, относя его к предельной величине  $\Delta P_{lim}$ , определяющей степень разрушения данного объекта

$$P_{n_{kj}}(\Delta P_{\phi}; \Delta P_{lim}) = \frac{\Delta P_{\phi}}{\Delta P_{lim_{kj}}} \quad (4)$$

где  $P_{n_{kj}}(\Delta P_{\phi}; \Delta P_{lim})$  - давление, приведенное к предельной величине  $\Delta P_{lim_{kj}}$ , определяющей  $k$ -ю степень разрушения  $j$ -го объекта;  $\Delta P_{lim_{kj}}$  - предельная величина избыточного давления для  $k$ -й степени разрушения  $j$ -го объекта;  $\Delta P_{\phi}$  - текущее значение избыточного давления.

Для решения задач прогнозирования степени разрушения объекта, учитывая вероятностный характер ожидаемых последствий, определим параметрический закон фугасного воздействия взрыва на рассматриваемый объект, предполагая, что вероятности ожидаемых последствий взрыва описываются распределением Вейбулла.

**Параметрический закон последствий фугасного воздействия взрыва на технологическое оборудование, здания и сооружения.** Основываясь на указанном выше представлении о взрывоустойчивости и принимая в качестве предельного состояния среднюю степень разрушения рассматриваемого объекта [1,2,3], получим функцию вероятности потери взрывоустойчивости рассматриваемым типом объекта от величины действующего давления в следующей параметризации распределения Вейбулла:

$$G_{kj}(\Delta P_{\phi}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{P_{n_{kj}}(\Delta P_{\phi}; \Delta P_{lim}) - \delta_{kj}(\Delta P_{lim})}{r_{kj}(\Delta P_{lim})} \right)^{\varphi_k} \right], \quad (5)$$

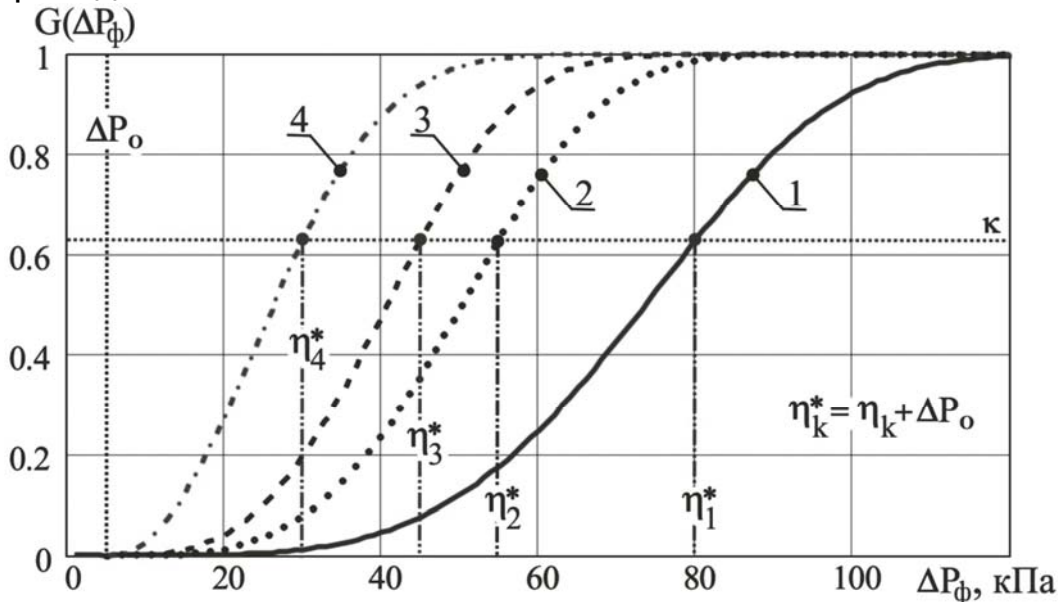
где  $G_{kj}(\Delta P_{\phi})$  - функция распределения вероятностей получения  $k$ -й степени разрушения  $j$ -м объектом в зависимости от давления  $\Delta P_{\phi}$ ;  $r_{kj}(\Delta P_{lim})$ ,  $\delta_{kj}(\Delta P_{lim})$ ,  $\varphi_k$  - параметры вероятностного закона распределения Вейбулла для  $k$ -й степени разрушения  $j$ -го объекта.

Параметры вероятностного закона распределения Вейбулла представлены нами функциями аргумента предельной величины избыточного давления  $\Delta P_{lim}$  для  $k$ -й степени разрушения  $j$ -го объекта

$$\left\{ \begin{aligned} r_{kj}(\Delta P_{lim}) &= \frac{\eta_{kj}(\Delta P_{lim})}{\Delta P_{limkj}}; & \eta_{kj}(\Delta P_{lim}) &= \frac{(\Delta P_{limkj} - \Delta P_o)}{\ln\left(\frac{1}{1-\kappa}\right)^{\frac{1}{\Phi_k}}}; \\ \delta_{kj}(\Delta P_{lim}) &= \frac{\Delta P_o}{\Delta P_{limkj}}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $\Delta P_o$  – порог разрушения рассматриваемого объекта;  $\kappa$  - константа масштабного параметра  $\eta_{kj}(\Delta P_{lim})$  распределения Вейбулла [26,28].

Покажем на рис.6, в качестве примера, характер изменения вероятности разрушения  $G(\Delta P_\phi)$  в функции величины избыточного давления на фронте воздушной ударной волны для промышленного здания с тяжелым железобетонным каркасом, значения  $\Delta P_{limkj}$  для которого приведены в табл.13.



1 - полные разрушения; 2 - сильные разрушения; 3 - средние разрушения; 4 - слабые разрушения

Рис. 6. Распределение Вейбулла для оценки вероятности разрушений

**Координатный закон фугасного воздействия взрыва на технологическое оборудование, здания и сооружения.** Для практического применения при прогнозировании последствий чрезвычайных ситуаций наиболее удобны координатные законы поражения (разрушения), устанавливающие функциональную связь вероятности «эффекта поражения» с расстоянием до источника поражающего фактора. Для решения данной задачи необходимо знать, как изменяется вероятность фугасного воздействия взрыва на рассматриваемые объекты по мере удаления от источника опасности, то есть от *параметри-*

ческого закона  $G(\Delta P_\phi)$  мы должны перейти к *координатному закону*  $G(\Gamma)$ .

Используя изложенный выше метод обратных функций распределения, в основу которого положены элементы теории функциональных преобразований случайных функций [38], определим координатный закон фугасного воздействия взрыва на технологическое оборудование, здания и сооружения в очаге взрыва

$$G_{kj}(\Gamma) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{P_{s_{kj}}(\Gamma; \Delta P_{lim}) - \delta_{kj}(\Delta P_{lim})}{r_{kj}(\Delta P_{lim})} \right)^{\Phi_k} \right], \quad (7)$$

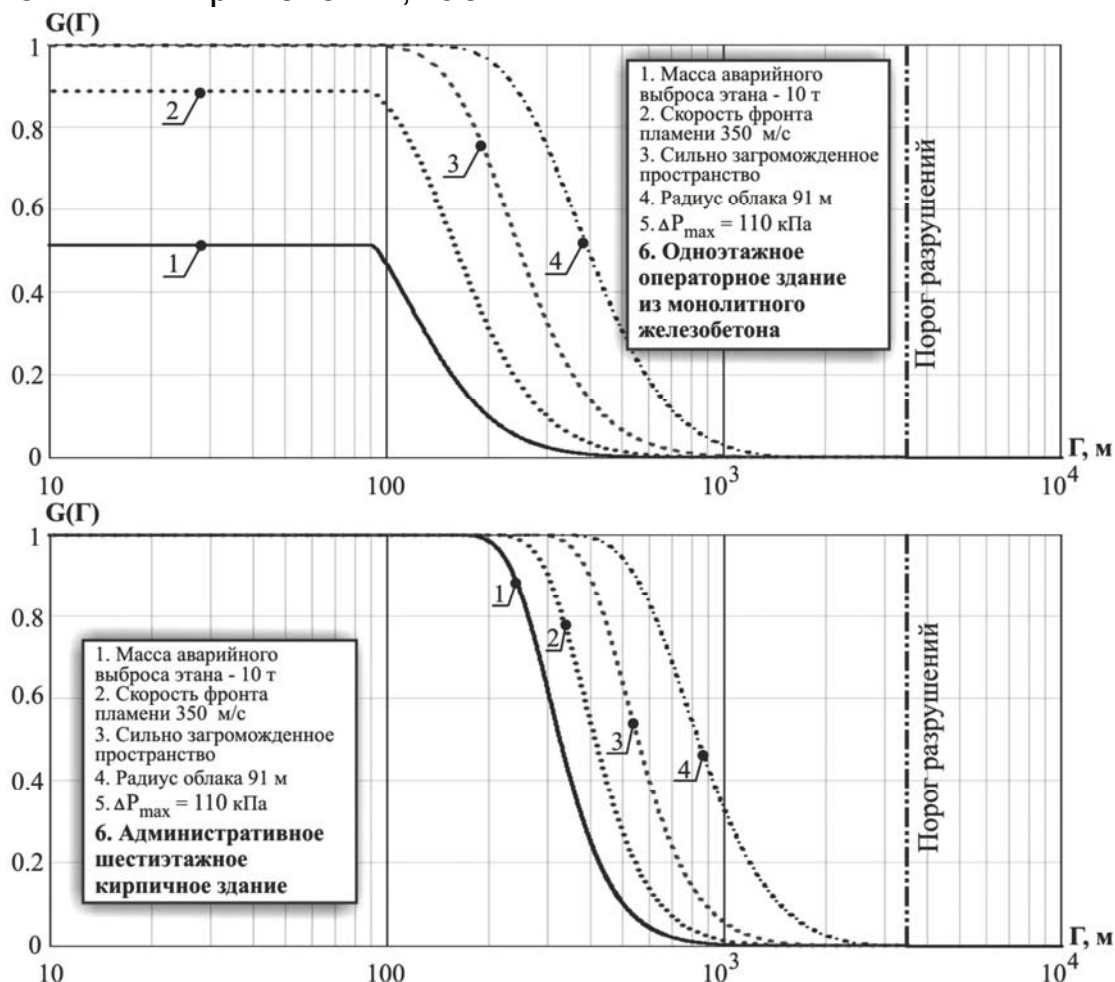
где  $G_{kj}(\Gamma)$  - функция распределения вероятностей получения  $k$ -й степени разрушения  $j$ -м объектом в зависимости от расстояния  $\Gamma$  до центра взрыва;  $P_{s_{kj}}(\Gamma; \Delta P_{lim}) = \frac{\Delta P_\phi(\Gamma)}{P_{lim_{kj}}}$  - функционал, характеризующий приведенное к предельной величине  $\Delta P_{lim_{kj}}$  давление для  $k$ -й степени разрушения, воздействующее на  $j$ -й объект на расстоянии  $\Gamma$  до центра взрыва;  $\Delta P_\phi(\Gamma)$  - функция, определяющая текущее значение избыточного давления на расстоянии  $\Gamma$  до центра взрыва.

Координатные законы для рассматриваемых степеней разрушения зданий различного назначения и типа конструкции, приведены, в качестве примера, на рис.7. Графики на данном рисунке отражают характер изменения вероятности разрушения зданий – одноэтажного операторного здания из монолитного железобетона и административного шестиэтажного кирпичного здания, в зависимости от их удаления от места возможного взрыва ГПВС этана. Степень устойчивости указанных зданий к воздействию избыточного давления определяется величиной  $\Delta P_{lim}$ , приведенной в табл.13.

Основываясь на литературных источниках [4, 5, 6, 10, 11, 12, 17, 23, 24, 34, 35, 36, 37] можно утверждать, что в практике количественной оценки последствий взрывов преобладают детерминированные методы, сводящиеся к зонированию прилегающей к потенциально опасному объекту территории по степени разрушений и выявлению зон повышенной опасности.

Вероятностные методы, позволяющие решать задачи прогнозирования ожидаемых последствий аварийных взрывов на потенциально опасных объектах до настоящего времени разработаны в недостаточной степени и в основном сводятся к использованию пробит-функций [4,5,6,23,24,25]. Причем авторы указанных работ, ссылаясь на первоисточник С.М. Pietersen [32], предлагают свои собственные

модификации пробит–функций, допуская при этом значительные различия в их применении, табл.14.



1 - полные разрушения; 2 - сильные разрушения; 3 - средние разрушения; 4 - слабые разрушения

Рис. 7. Координатные законы разрушения зданий различного назначения

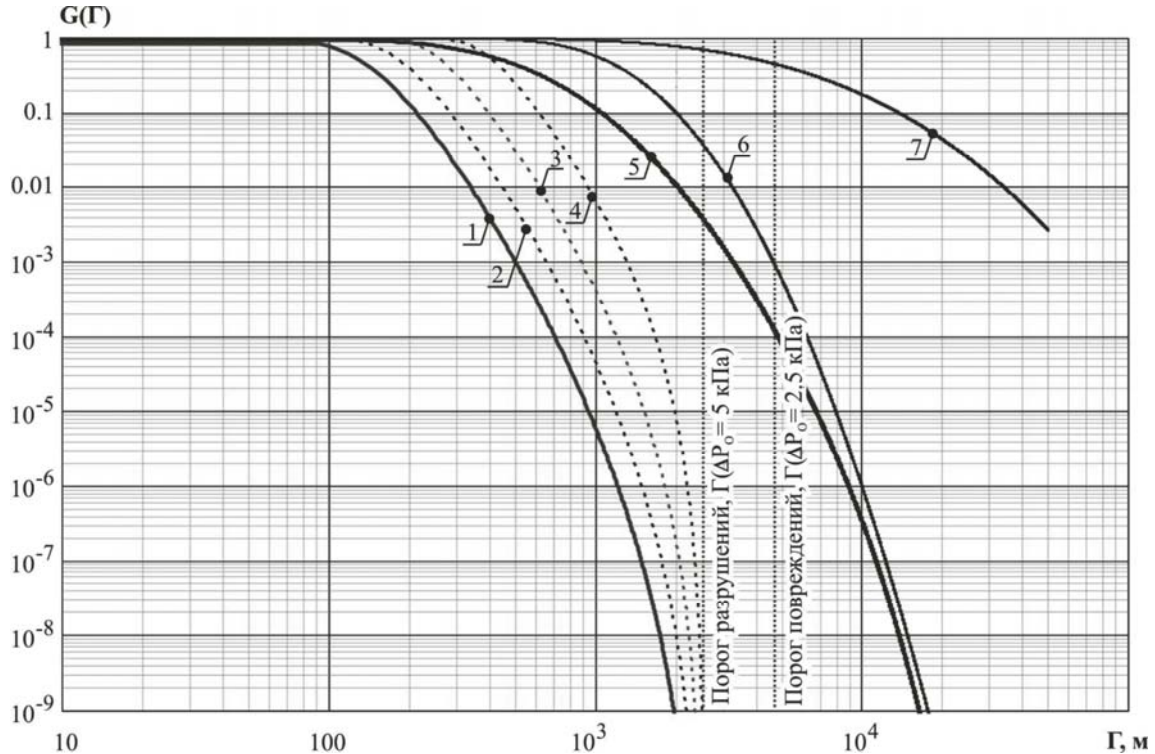
Таблица 14

Пробит–функции разрушений зданий ударной волной

Характер разрушения здания	Пробит–функция	Воздействующие факторы
Тяжелые разрушения по [25]; Средние разрушения по [5]; Трудно реставрируемые повреждения по [6]; Повреждения по [39]; Повреждения стен промышленных зданий по [4]	$Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln(V_1)$	$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P_\Phi}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3}$
Полные разрушения по [25] и [24]; Сильные разрушения по [5]; Полные разрушения промышленных зданий по [4,6]; Разрушения по [39];	$Pr_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln(V_2)$	$V_2 = \left(\frac{40000}{\Delta P_\Phi}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3}$
Слабые разрушения по [5]	$Pr_3 = 5 - 0,26 \cdot \ln(V_3)$	$V_3 = \left(\frac{4600}{\Delta P_\Phi}\right)^{3,9} + \left(\frac{110}{I}\right)^{5,0}$

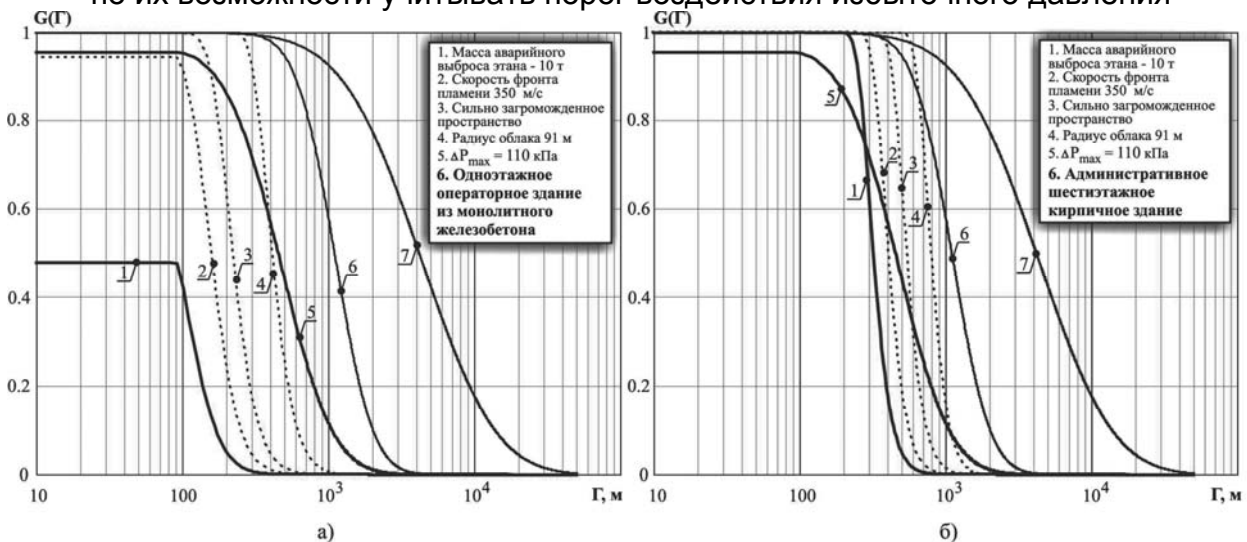
Примечание:  $\Delta P_\Phi$  - избыточное давление, Па; I - удельный импульс, Па·с.

Проведем сравнительный анализ координатных законов разрушений, полученных на основе распределения Вейбулла (7) и пробит-функций (табл.14). Результаты сравнения рассматриваемых законов разрушений проиллюстрированы, в качестве примера, на рис.8, рис.9 и табл.15.



Распределение Вейбулла формула (7): 1 - полные разрушения; 2 - сильные разрушения; 3 - средние разрушения; 4 - слабые разрушения. Пробит-функции по данным табл.14: 5 -  $Pr_1$ ; 6 -  $Pr_2$ ; 7 -  $Pr_3$ .

Рис.8. Сравнительный анализ координатных законов разрушений по их возможности учитывать порог воздействия избыточного давления



Распределение Вейбулла формула (7): 1 - полные разрушения; 2 - сильные разрушения; 3 - средние разрушения; 4 - слабые разрушения. Пробит-функции по данным табл.2.2.19: 5 -  $Pr_1$ ; 6 -  $Pr_2$ ; 7 -  $Pr_3$ .

Рис.9. Сравнительный анализ координатных законов разрушений по их возможности учитывать предел устойчивости зданий к воздействию избыточного давления

Таблица 15

Вероятности разрушений для распределения Вейбулла  
 и распределений на основе пробит–функций

Расстояние от центра взрыва, м	Избыточное давление, кПа	Значения вероятностей разрушений для указанных распределений						
		Распределение Вейбулла для разрушений одноэтажного операторного здания из монолитного железобетона				Распределения на основе пробит–функций для разрушений		
		полных	сильных	средних	слабых	полных [5] сильных [4]	сильных [6] средних [5]	слабых [5]
91	110	0.48	0.944	1	1	0.955	1	0.999
200	68.9	0.049	0.236	0.751	1	0.859	0.999	0.998
400	37.6	$1.41 \times 10^{-3}$	$9.95 \times 10^{-3}$	0.066	0.532	0.564	0.978	0.989
600	24.9	$1.08 \times 10^{-4}$	$9.29 \times 10^{-4}$	$7.67 \times 10^{-3}$	0.109	0.332	0.889	0.973
800	18.3	$1.34 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-4}$	$1.31 \times 10^{-3}$	0.025	0.192	0.738	0.95
1000	14.3	$2.14 \times 10^{-6}$	$2.48 \times 10^{-5}$	$2.78 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-3}$	0.112	0.57	0.924
1200	11.7	$3.85 \times 10^{-7}$	$5.12 \times 10^{-6}$	$6.54 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-3}$	0.067	0.418	0.895
1400	9.9	$7.20 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-5}$	$5.54 \times 10^{-4}$	0.041	0.298	0.864
1600	8.5	$1.29 \times 10^{-8}$	$2.22 \times 10^{-7}$	$3.69 \times 10^{-6}$	$1.57 \times 10^{-4}$	0.025	0.208	0.833
1800	7.4	$1.99 \times 10^{-9}$	$3.96 \times 10^{-8}$	$7.59 \times 10^{-7}$	$4.02 \times 10^{-5}$	0.016	0.144	0.802
2000	6.6	$2.3 \times 10^{-10}$	$5.31 \times 10^{-9}$	$1.20 \times 10^{-7}$	$8.18 \times 10^{-6}$	0.011	0.099	0.771
2557	5.0	0	0	0	0	$3.48 \times 10^{-3}$	0.035	0.689
4691	2.5	0	0	0	0	$1.17 \times 10^{-4}$	$8.93 \times 10^{-4}$	0.447

Исходя из представленных на рис.8, рис.9 графиков и данных табл.15 о результатах расчетов вероятностей разрушений зданий по распределению Вейбулла и распределениям на основе пробит–функций, представленных в нормативной, справочной и учебно-методической литературе, можно констатировать:

- распределения на основе пробит–функций не позволяют учитывать пределы устойчивости зданий  $\Delta P_{lim}$  к воздействию ударной волны и, как следствие, дают одинаковые значения вероятностей для зданий различного назначения и типа конструкции;

- распределения на основе пробит–функций не позволяют учитывать порог воздействия избыточного давления и, как следствие, вероятности разрушений остаются значимыми и за пределами не только порога разрушений  $\Delta P_o = 5$  кПа, но и порога малых повреждений  $\Delta P_o = 2.5$  кПа;

- представленные в нормативной и справочной литературе распределения на основе пробит–функций не применимы для определения вероятностей разрушений технологического оборудования, различных энергетических сооружений, трубопроводов, транспорта и т.д.;

- представленные в нормативной, справочной и учебно-методической литературе распределения на основе пробит–функций при одинаковых параметрах имеют значительный разброс относительно определяемых степеней разрушений при воздействии ударной



волны, что затрудняет их использование при расчетах потенциального риска.

### **Выводы.**

1. В статье предложен, обоснован и используется, в качестве параметрических законов фугасного поражения реципиента при количественной оценке риска последствий возможных аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли трехпараметрический закон распределения Вейбулла.

2. Определены, основываясь на анализе эмпирико-статистических данных о характере воздействия избыточного давления на человека, технологическое оборудование, здания и сооружения, численные значения параметров распределения Вейбулла для соответствующих параметрических законов поражения реципиента.

3. Учитывая, что различные здания, сооружения или технологическое оборудование при одинаковом внешнем воздействии на них избыточного давления, имеют значительный разброс предела взрывоустойчивости  $\Delta P_{lim}$ , параметры вероятностного закона распределения Вейбулла обоснованы и представлены нами функциями аргумента  $\Delta P_{lim}$  для соответствующей степени разрушения рассматриваемого объекта. Такой подход позволяет при количественной оценке риска возможных разрушений при авариях в нефтегазовой отрасли учесть тип, назначение, конструктивные особенности различных зданий, сооружений или технологического оборудования.

4. Для практического применения при прогнозировании последствий чрезвычайных ситуаций в нефтегазовой отрасли наиболее удобны координатные законы поражения, устанавливающие функциональную связь вероятности «эффекта поражения» с расстоянием до источника поражающего фактора. С этой целью, используя метод обратных функций распределения, в основу которого положены элементы теории функциональных преобразований случайных функций, нами обоснован и выполнен аналитический переход от параметрических законов поражения реципиента к координатным законам, позволяющим получить распределение потенциального риска на прилегающей к потенциально опасному объекту территории.

5. Проведен сравнительный анализ координатных законов фугасного поражения реципиента, полученных на основе распределения Вейбулла и пробит-функций. Выполненный сопоставительный анализ позволяет утверждать, что полученные нами законы фугасного поражения реципиента, аппроксимируемые распределением Вейбулла, наиболее адекватны процессам воздействия ударной волны на чело-

века в очаге дефлаграционного взрыва, сформировавшегося при авариях на взрывоопасных объектах нефтегазовой отрасли.

6. Полученные параметрические и координатные законы фугасного поражения реципиента, являясь базовой основой стохастических моделей потенциального, индивидуального и коллективного риска, позволяют при количественном анализе риска в нефтегазовой отрасли ранжировать прилегающую территорию по уровню опасности и выявить зоны и территории, где уровни риска достигают или превышают значения, при которых необходимо ужесточение контроля или принятия определенных мер по снижению риска и обеспечению нормативной безопасности производственного персонала и населения.

## Литература

1. Козлитин А.М., Попов А.И. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы. Саратов: СГТУ, 2000. 216 с.

2. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: СГТУ, 2002. 180 с.

3. Декларирование безопасности и страхование гражданской ответственности потенциально опасных предприятий Саратовской области: Организационно-методические материалы / А.М. Козлитин, Е.А. Ларин, А.И. Попов и др. Саратов: СГТУ, 1996. 172 с.

4. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Серия 27. Вып. 2. М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. 224 с.

5. Мастрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 336 с.

6. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 512 с.

7. Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 672 с.

8. Strehlow R.A., Baker W.E. The characterization and evaluation of accidental explosions. NASA Report No. CR-134779, Technical Information Service, Springfield, USA, 1975.

9. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.

10. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 304 с.

11. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки: Учеб. пособие / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.В. Забегаев и др. М.: Высш. шк., 1992. 319 с.

12. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения: Справочник / Г.П. Демиденко, Е.П. Кузьменко, П.П. Орлов; Под ред. Г.П. Демиденко. Киев: Высш. шк., 1989. 287 с.

13. Уткин В.И. Оружие повышенной эффективности с топливовоздушными взрывчатыми веществами // Гражданская оборона: Информационный сборник. М.: ВИМИ, 1990. Вып.5. С.24-27.

14. Козлитин А.М., Яковлев Б.Н. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка: детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: Учеб. пособие / Под ред. А.И. Попова. Саратов: СГТУ, 2000. 124 с.

15. Glasstone S., Dolan P.J. The effects of nuclear weapons. Prepared by the US Department of Defense and the US Department of Energy. Castle House Publications, Tunbridge Wells, UK, 1980.

16. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 кн. Пер. с англ. / У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др. / Ред. Я.Б. Зельдович, Б.Е. Гельфанд. М.: Мир, 1986. Кн.1 - 384 с. Кн.2 – 396 с.

17. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика. М.: НК Лукойл, 2000. 185 с.

18. Безопасность взрывных работ в промышленности / Под ред. Б.Н. Кутузова. М.: Недра, 1992. 544 с.

19. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. В 2 кн. Кн.2. М.: МЧС России, 1994. 76 с.

20. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: В 3 кн. Кн.2. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях / Под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: ЗАО «Папирус», 1998. 166 с.

21. Гус М. Сжиженный нефтяной газ. Методы оценки рисков для сжиженного нефтяного газа. Департамент по охране здоровья и труда. Великобритания. 2001. 5 с.

22. Ларионов В.И., Акатьев В.А., Александров А.А. Риск аварий на автозаправочных станциях // Безопасность труда в промышленности. 2004. №2. С. 44 – 48.

23. НПБ-105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.

24. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: РАО «Газпром», 1996. 208 с..

25. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я. Моделирование пожаров технологических объектов // В кн.: Моделирование пожаров и взрывов. М.: / Под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. М.: Пожнаука, 2000. С. 198 - 219.

26. Ernest J. Henley, Hiromitsu Kumamoto. Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1981. 530 p.

27. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. Сов. Радио, 1968. 70 с.

28. Lawless J.F. Statistical Models and Methods For Lifetime Data. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.

29. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Анализ методик оценки последствий взрывов на потенциально опасных объектах техносферы // Устойчивое экологическое развитие: региональные проблемы: Международ. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2001. С. 34-62.

30. Таубкин И.С., Прохоров Д.В., Уршанский М.А., Толчев В.Н. Экспертный анализ причин взрыва сжиженного углеводородного газа в авторемонтных мастерских // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1999. Вып.5. С. 76-87.

31. Саклантй А.Р., Таубкин И.С. Причины и последствия взрывов на канализационных насосных станциях. Обобщение экспертной практики // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2002. Вып.1. С. 146-169.

32. Pietersen C.M. Consequences of accidental releases of hazardous material. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1990. Vol. 3, №1. P. 136-141.

33. Eisenberg N.A., Lynch C.J., Breeding R.J. Vulnerability model: A simulation system for assessing damage resulting from marine spills. US Coast Guard report No. CG-D-137-75, 1975.

34. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.

35. Величко К.Ф. и др. Оценка устойчивости работы объектов и систем народного хозяйства. М.: МИФИ, 1984. 70 с.

36. Морозов В.Н. Прогнозирование последствий аварийных взрывов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1996. Вып.10. С.72-84.

37. Frank P. Lees Loss Prevention in the Process Industries. Butter worth Heinemann. 1996. V1,V2.

38. Ивановский Р.И. Компьютерные технологии в науке и образовании. Практика применения систем MathCAD Pro: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2003. 431 с.

39. Котляревский В.А., Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Безопасность резервуаров и трубопроводов. М.: Экономика и информатика. 2000. 552 с.