По материалам публикаций:

Гражданкин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Риск аварии как оценка нежелательных потерь//Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды Международной Научной Школы МА БР–2002 (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2002 г.). - СПб: Издательство «Бизнес-Пресса». - 2002 – С.515-518.

Гражданкин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Основные показатели риска аварии в терминах теории вероятностей//Безопасность труда в промышленности. – 2002. – N7. - С.35-39.

РИСК АВАРИИ КАК ОЦЕНКА НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ

При количественной оценке риска, проводимой в рамках декларирования и экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО), важно соблюдать единство подходов при использовании основных показателей риска аварии. Результаты декларирования промышленной безопасности ОПО показывают, что не всегда достаточно четко и определенно представляются результаты оценки риска промышленной аварии.

Рассмотрим понятие «риск аварии», как меру опасности, характеризующую возможность возникновения аварии на ОПО и тяжесть ее последствий [1]. Так как авария на ОПО может быть отнесена к случайным явлениям, то в самом простом случае мера опасности может быть оценена при анализе случайных величин ущербов (вреда) или потерь от аварии. Так, например, при рассмотрении события «отказ технического устройства» («технический риск» - РД 03-418-01[1]) в теории надежности [3, 6] оперируют *дискретной характеристической* [2] случайной величиной X, которая равна 1, если отказ происходит за определенное время, и равна 0, если не происходит. (Однако чаще в теории надежности используют случайную величину T: момент времени наступления отказа).

В свою очередь события, связанные с крупными нежелательными последствиями в сложных системах (например: банкротство компании в бизнесе[1], авария на ОПО), обычно анализируют с помощью рассмотрения случайной величины потерь (ущербов) $Y \geq 0$ [7] при планируемой или

[1] На экономическом жаргоне так кратко и говорят: «Риск – это нежелательные потери».

осуществляемой деятельности. (На экономическом жаргоне так кратко и говорят: «Риск – это нежелательные потери»).

В области промышленной безопасности $Y \geq 0$ – это случайная величина потерь (ущербов, вреда) от аварии при эксплуатации ОПО. Приведенные в РД 03-418-01 [1] определения количественных показателей риска аварии - *индивидуальный, коллективный и социальный риск, ожидаемый ущерб* - и представляют собой собственно характеристики случайной величины аварийных потерь Y при эксплуатации ОПО.

Несколько особняком стоит *потенциальный территориальный риск*, который характеризует случайное событие – «возникновение при аварии в определенной точке пространства поражающих факторов с уровнем достаточным для смертельного поражения человека» - и определяется, как и технический риск, с помощью дискретной характеристической случайной величины D, которая равна 1, если такое событие происходит за определенное время, и равна 0, если не происходит.

В практике анализа риска аварии, обычно, потери Y разделяют на материальные – G (непрерывная случайная величина) и людские – N (дискретная случайная величина). Для описания дискретных и непрерывных случайных величин будем в дальнейших рассуждениях использовать случайные величины N и G соответственно, а для общего случая будем употреблять Y. Специально отметим, что дальнейшие рассуждения, не претендуя на новизну и всеохватность, приводятся для упорядочивания и определения места в теории вероятностей показателей риска аварии, используемых при декларировании и экспертизе промышленной безопасности ОПО.

Кроме того, обратим внимание на тот факт, что в практике анализа риска аварии традиционно чаще оперируют не с вероятностями, а со средними интенсивностями (частотами) нежелательных событий за определенное время. Если рассматривать происходящие аварии как *стационарный пуассоновский* *поток событий*, то связь между вероятностью события $P_A(t)$ и его интенсивностью λ достаточно проста [2]:

$$P_A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \text{ причем при } \lambda t < 0.01 \quad P_A(t) = \lambda t, \qquad (1)$$

поэтому все последующие обсуждения в данной статье приводятся в терминах вероятностей и при необходимости могут быть достаточно легко видоизменены. Более подробно о связи величин, используемых при оценке риска аварии см. в [4].

Рассмотрим дискретную случайную величину людских потерь N при аварии на ОПО с возможными значениями n_0=0, n_1, n_2, ..., n_k. Каждое из этих значений величина N может принять с некоторой вероятностью p_0, p_1, p_2, ..., p_k. Дискретная случайная величина N считается полностью описанной с вероятностной точки зрения, если установлен *закон распределения* [2] случайной величины, который обычно представляют в виде таблицы - *ряда распределения* [2]:

$$\begin{array}{c||c|c|c|c|c|}
n_i & 0 & n_1 & n_2 & \cdots n_s \cdots & n_k \\
\hline
p_i & 1-\sum\limits_{i=1}^{k} p_i & p_1 & p_2 & \cdots p_s \cdots & p_k
\end{array},$$

причем $\sum\limits_{i=0}^{k} p_i = 1$, а $p_{i=0} = 1 - \sum\limits_{i=1}^{k} p_i$ - есть вероятность безаварийной эксплуатации ОПО.

Чтобы придать ряду распределения более наглядный вид, часто прибегают к его графическому изображению: по оси абсцисс откладываются возможные значения случайной величины, а по оси ординат – вероятности этих значений. Только для наглядности полученные точки могут соединяться отрезками прямых. Такая фигура называется *многоугольником распределения* [2]. Пример многоугольника случайной величины N для типичного ОПО представлен на рис. 1.

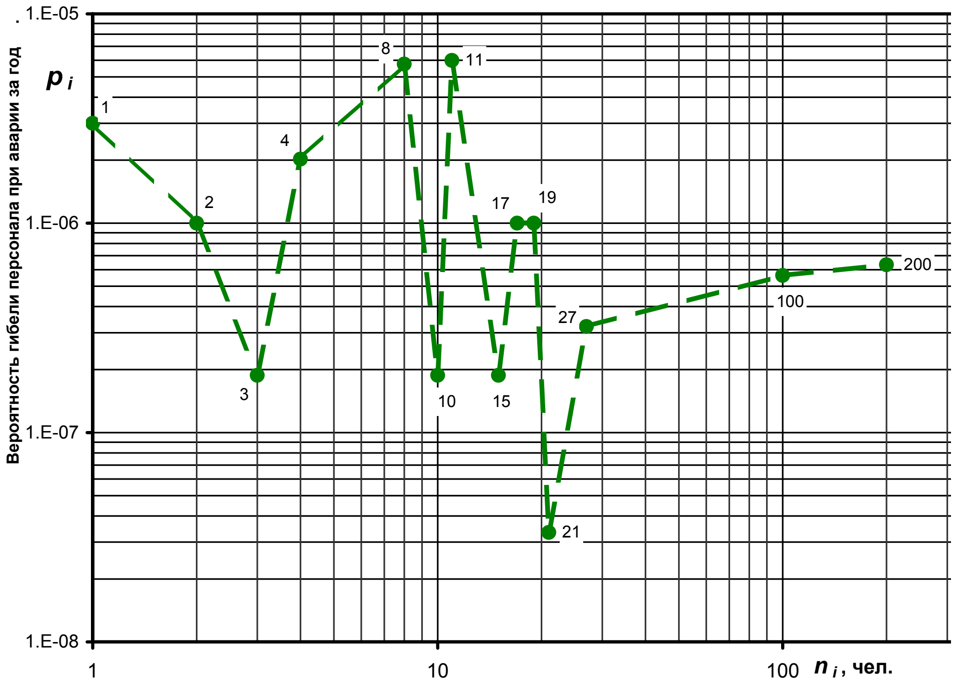

Рис. 1. Многоугольник распределения числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком

Многоугольник распределения, так же как и ряд распределения, полностью характеризует случайную величину; он является одной из форм закона распределения.

С точки зрения теории вероятностей нетрудно убедиться, что для непрерывной случайной величины ряд распределения построить нельзя [2]. Действительно, непрерывная случайная величина имеет бесконечное множество возможных значений (так называемое «несчетное множество»). Кроме того, каждое отдельное значение непрерывной случайной величины обычно не обладает никакой отличной от нуля вероятностью. Поэтому «самой универсальной характеристикой» [2] любой случайной величины Y является ее *функция распределения* $F(y)$, равная вероятности P того, что случайная величина Y примет значение меньше y:

$$F(y) = P(Y < y). \qquad (2)$$

Функцию распределения $F(y)$ иногда называют так же *интегральным законом распределения* [2].

В практике анализа риска [1,5,8,9] обычно используют несколько видоизмененную характеристику случайной величины потерь - $\overline{F}(y)$:

$$\overline{F}(y) = P(Y \geq y)\,. \tag{3}$$

Чаще всего ее называют *F/N-кривой(-диаграммой)* или *F/G-кривой*. Однако за этими общеупотребительными названиями, как и за их графическим изображением «скрывается» классическая функция распределения потерь $F(y)$ только построенная в координатах $\{y;\ 1\text{-}F(y)\}$, так как:

$$\overline{F}(y) \equiv 1 - F(y)\,. \tag{4}$$

Условимся далее называть такую характеристику случайной величины потерь Y при аварии на ОПО *интегральной функцией распределения потерь* $\overline{F}(y)$ (F/Y-кривая). Пример графического изображения интегральной функции распределения потерь персонала при аварии $\overline{F}(n)$ (F/N-кривая) для многоугольника распределения с рис. 1 представлен ниже. (Кривая «социального риска» по РД 03-418-01[1]).

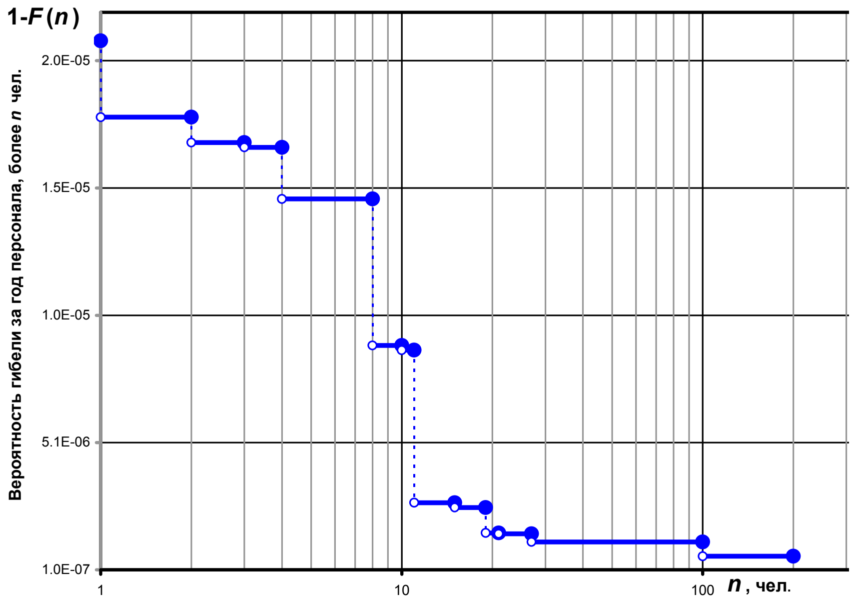

Рис. 2. Интегральная функция распределения числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком (F/N-кривая)

Для полноты картины приведем основные свойства *интегральной функции распределения потерь* $\overline{F}(y)$ (*F/Y-кривая*), как функции распределения потерь при аварии на ОПО $F(y)$, построенной в координатах $\{y;\ 1\text{-}F(y)\}$:

1. Интегральная функция распределения потерь $\overline{F}(y)$ есть невозрастающая функция с неотрицательной[1] областью определения своего

[1] Здесь мы сознательно не принимаем в рассмотрение отрицательные значения Y, которые в общем случае могут существовать и трактоваться как «прибыль или положительный эффект от аварии», - этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

аргумента $y \in [0,+\infty)$, т.е. при $y_2 > y_1$ $\overline{F}(y_2) \leq \overline{F}(y_1)$. (Здесь мы сознательно не принимаем в рассмотрение отрицательные значения Y, которые в общем случае могут существовать и трактоваться как «прибыль или положительный эффект от аварии», - этот вопрос выходит за рамки обсуждаемого вопроса).

2. На плюс бесконечности интегральная функция распределения потерь равна нулю: $\overline{F}(+\infty) = 0$.
3. При нулевом аргументе интегральная функция распределения потерь принимает значение равное единице: $\overline{F}(0) = 1$.
4. Интегральная функция распределения людских потерь $\overline{F}(n)$ есть разрывная ступенчатая функция, скачки которой происходят в точках, соответствующих возможным значениям случайной величины *N*, и равны вероятностям этих значений. Сумма всех скачков $\overline{F}(n)$ равна единице.
5. Вероятность попадания случайной величины на заданный участок $\alpha \leq Y < \beta$ равна модулю приращения интегральной функции распределения $\overline{F}(y)$ на этом участке: $P(\alpha \leq Y < \beta) = \overline{F}(\alpha) - \overline{F}(\beta)$.

5а. При *g*=1(тн) значение интегральной функции распределения потерь нефти $\overline{F}(g)$, например, для линейной части магистральных нефтепроводов равно вероятности за год аварии с разливом более 1тонны нефти. Значение F/N-кривой при *n*=1 чел. равно вероятности несчастного случая со смертельным исходом, связанного с аварией на ОПО.

Отдельно остановимся на вопросе графического изображения *интегральной функции распределения потерь* $\overline{F}(y)$ (*F/Y-кривая*), так как даже в наиболее известном переводном источнике о промышленных авариях такой алгоритм построения представлен с неточностями (см. рис. 4.1 на стр.48 в [5]). К тому же в некоторых декларациях промышленной безопасности многоугольники распределения потерь «выдаются» за F/Y-кривые: предпринимаются безуспешные попытки (рис. 3) аппроксимировать точки многоугольника распределения, которые могут непосредственно соединяться отрезками прямых только для наглядности [2]. Какая-либо обоснованная целесообразность поиска гладкой функциональной зависимости среди дискретных значений отсутствует.

Например, внимательно рассматривая «F/N-кривую» и околорасположенные точки (рис. 3) можно узнать, что в «районе административных зданий» раз в тысячу лет при аварии может погибнуть точно 1,3 человека (руководитель-1,0 и помошник-0,3?). Однако, судя по «авторской F/N-кривой», не менее тех же загадочных 1,3 человек будут гибнуть уже гораздо реже – раз в пять тысяч лет, а раз в тысячу лет погибнет не менее «получеловека».

Несомненно, можно предположить, что использование не дискретной, а непрерывной случайной величины людских потерь на рис. 3 связано с трактовкой смерти, как крайней степени травмирования человека. Однако в этом случае необходимо располагать однозначной зависимостью между степенью травмирования и, например, потерянным временем жизни человека: «шкала Россера» (R. Rosser, P. Kund, 1978). Возможное толкование величины людских потерь в 1,3 человека, как условия непостоянного нахождения персонала на рабочем месте полностью несостоятельна, т.к. все возможные условия необходимо включать в полное значение вероятности гибели персонала в соответствии с теоремой умножения вероятностей [2].

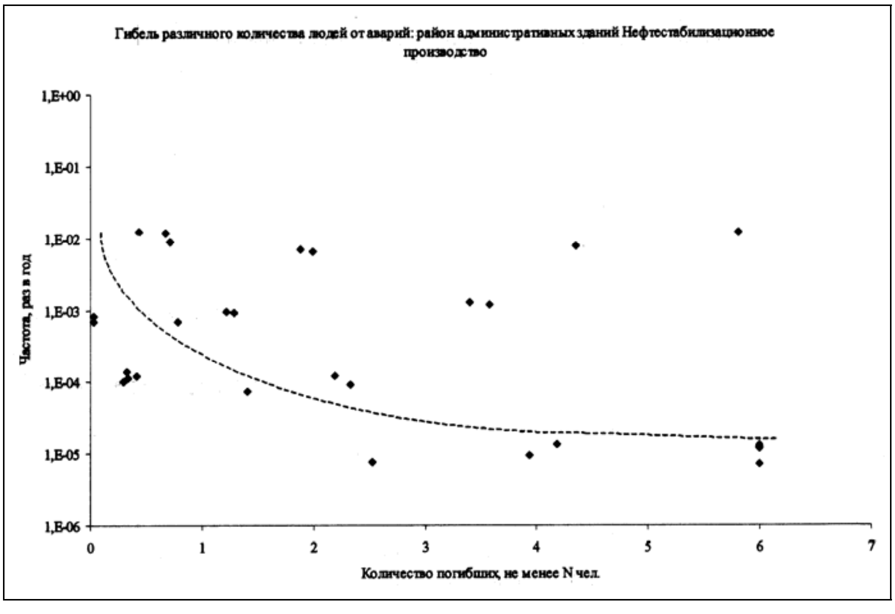

Рис. 3 Типичный пример неправильного построения F/N-кривой

Здесь еще раз необходимо напомнить, что одной из основных целей оценки риска аварии является получение достоверных количественных показателей пригодных для эффективного управления процессом обеспечения промышленной безопасности на ОПО. Оперирование неоднозначными исходными данными даст такие же неоднозначные практические рекомендации и результаты управления.

Для устранения возможных разночтений, а так же для более удобного построения F/N-кривых приведем формулу (3) в развернутом виде:

$$\overline{F}(y)=\begin{cases}1, & y=0\\ \sum_{i=1}^{k} p_i = 1-p_0, & 0<y\le y_1\\ \dots & \dots\\ \sum_{i=s}^{k} p_i, & y_{s-1}<y\le y_s\\ \dots & \dots\\ p_k, & y_{k-1}<y\le y_k\\ 0, & y_k<y<\infty\end{cases}, \qquad (5)$$

В частности, из формул (3) и (5) следует, что никакие точки, обозначающие отдельные сценарии аварии, не могут лежать выше F/Y-кривой (см. рис. 3).

Для непрерывной случайной величины материальных потерь при аварии *G* может быть определена и ее *функция плотности распределения (плотность вероятности)*[2]:

$$f(g)=F'(g)=-\overline{F}'(g), \qquad (6)$$

Среди основных числовых характеристик случайных величин нужно, прежде всего, отметить те, которые характеризуют положение и разброс значений случайной величины на числовой оси: *математическое ожидание*, *мода*, *медиана* и *дисперсия*.

Математическое ожидание дискретной случайной величины *N* (*коллективный риск* [1]) определяется как:

$$R_{êîë}=M[N]=\sum_{i=1}^{k} n_i p_i\ . \qquad (7)$$

Если ввести в рассмотрение случайную величину числа рискующих попасть в аварию *U*, то можно записать общее выражение для среднего по группе *индивидуального риск*а $R_{инд}$[1], как математического ожидания частного случайных величин N и U:

$$R_{\text{èíä}} = M\left[\frac{N}{U}\right] = M[N]\cdot M\left[\frac{1}{U}\right] + K_{n1/u}\,, \qquad (8)$$

где $K_{n1/u}$ - *корреляционный момент* [2] случайных величин N и $1/U$. В частном случае при U=const:

$$R_{\text{èíä}} = M\left[\frac{N}{U \equiv const}\right] = \frac{1}{u}M[N] = \frac{R_{\text{êîë}}}{u}\,, \qquad (9)$$

где u – общее число рискующих людей в группе.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины G (*ожидаемый ущерб* [1]) определяется как:

$$R_{\$} = M[G] = \int_0^{\infty} g f(g)\,dg\,, \qquad (10)$$

Модой Mo дискретной случайной величины называется ее *наиболее вероятное значение*, а непрерывной – значение, в котором максимальна плотность вероятности [2].

Медианой случайной величины Y называется такое ее значение Me, для которого $P(Y < Me) = P(Y > Me)$ [2]. В случае симметричного модального распределения медиана совпадает с математическим ожиданием и модой.

Для полноты приведем и формальное определение дисперсии случайной величины Y -математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины $\overset{\circ}{Y}$: $D[Y] = M[\overset{\circ}{Y}{}^2]$. Более подробно о свойствах и способах вычисления дисперсии см. в [2].

Таким образом, в терминах теории вероятностей основные показатели, используемые при анализе риска аварии на ОПО, выглядят следующим образом:

Показатель риска аварии на ОПО		**Исследуемая случайная величина**			**Показатель риска в терминах теории вероятностей,**		
название	**обозначение**	**название**	**тип**	**обозначение**	**название**	**формула или описание**	**Ссылка, (№)**
Технический риск	-	Есть-нет отказ	Дискретная характеристическая	X	вероятность отказа с последствиями определенного уровня, который произойдет за	$p_{i=1}$ - вероятность того, что X=1	-

					некоторый отрезок времени		
Потенциальный территориальный риск	-	Есть-нет поражающие факторы смертельного уровня поражения	Дискретная характеристическая	*D*	вероятности возникновения за определенное время в некоторой точке пространства смертельно поражающих факторов	$p_{i=1}$ - вероятность того, что D=1	-
Социальный риск	*F/N*-кривая	Людские потери при аварии	Дискретная	*N*	Интегральная функция распределение людских потерь	$\overline{F}(n) = P(N \geq n)$	(3), (5)
Полное описание сценариев аварии с гибелью людей		Людские потери при аварии	Дискретная	*N*	Ряд распределения *N* (графически – многоугольник распределения)	$\begin{array}{c\|c\|c\|c\|c\|c} n_i & 0 & n_1 & n_2 & \cdots n_s \cdots & n_k \\ p_i & 1-\sum_{i=1}^{k} p_i & p_1 & p_2 & \cdots p_s \cdots & p_k \end{array}$	-
Коллективный риск	$R_{кол}$	Людские потери при аварии	Дискретная	*N*	Математическое ожидание *N*	$R_{êîë} = M[N] = \sum_{i=1}^{k} n_i p_i$	(7)
Индивидуальный риск	$R_{инд}$	Людские потери при аварии и число рискующих	Дискретные	*N* и *U*	Математическое ожидание частного *N* и *U*	$R_{èíä} = M\left[\frac{N}{U}\right] = M[N] \cdot M\left[\frac{1}{U}\right] + K_{n1/u}$	(8)
Риск материальных потерь	*F/G*-кривая	Материальные потери при аварии	Непрерывная	*G*	Интегральная функция распределение материальных потерь	$\overline{F}(g) = P(G \geq g)$	(3), (5)
Полное описание сценариев аварии с материальными потерями	-	Материальные потери при аварии	Непрерывная	*G*	Плотность вероятности *G* (графически – кривая распределения)	$f(g) = F'(g) = -\overline{F}'(g)$	(6)
Ожидаемый ущерб	-	Материальные потери при аварии	Непрерывная	*G*	Математическое ожидание *G*	$R_{\$} = M[G] = \int_0^{\infty} gf(g)dg$	(10)
Наиболее вероятный ущерб	-	Материальные потери при аварии	Непрерывная	*G*	Мода *G*	Значение $G=g$, при котором $f(g) \to \max$	(6)
Полный ожидаемый вред/ущерб от аварии	R_{Σ}	Людские и материальные потери при аварии	Смешанная	*N, G*	Сумма математических ожиданий *N* и *G*	$R_{\Sigma} = H \cdot \sum_i n_i p_i + \int gF'(g)dg$ где H – стоимостная оценка человеческой жизни.	(7), (10)

Кратко коснемся вопроса о точности и достоверности получаемых оценок, т.к. в общем случае при анализе риска аварии приходится иметь дело с неточными и неполными исходными данными, а в рассмотрение принимается только основная часть спектра сценариев возможных аварий на ОПО. В самом простом случае для решения подобных задач в дополнение к методам теории вероятностей могут использоваться с соответствующими условиями стандартные методы математической статистики, как для определения законов распределения случайных величин потерь при аварии на ОПО, так и для нахождения неизвестных параметров этих распределений.

В заключении, в качестве обобщающего итога отметим следующее:

1. При количественной оценке риска аварии ОПО - задача максимум: определить полный ряд распределения рассматриваемых случайных величин X, D и N, построить F/Y-кривые или функцию плотности вероятности потерь G от аварии, а задача минимум: оценить основные числовые характеристики случайных величин материальных G и людских N потерь – матожидание, моду и дисперсию.
2. Использование более полного набора достоверных количественных показателей позволяет более обоснованно оценивать риск аварии и, соответственно, предлагать обоснованные рекомендации, направленные на обеспечение промышленной безопасности ОПО.

Список литературы.

1. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (утв. Пост. Госгортехнадзора России № 30 от 10.07.2001 г.)
2. ***Вентцель Е.С.*** Теория вероятностей. - М.: Высш. Шк., 1998. – 576 с.: ил.
3. ***Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.*** Математические методы в теории надежности, “Наука”, М., 1965; 333с.
4. ***Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С.*** Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов//Безопасность труда в промышленности. – 2001. - №5. - С.33-36.
5. ***Маршалл В.*** Основные опасности химических производств: Пер. с англ.- Москва: Мир, 1989. – 672 с.
6. ***Хенли Э. Дж., Кумамото Х.*** Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
7. ***Aven T.*** Reliability and Risk Analysis. Elsevier Applied Science, 1992.
8. ***Finkelstein M.S.*** Measured of Risk and a Concept of Acceptable Risk / Proceeding of the International Scientific School Modelling and Analysis of Safety, Risk and Quality in Complex Systems, SPb. – 2001.
9. ***Rasmussen N.*** Reactor Safety Study – an Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, Oct 1975.