ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ, НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Токарев Д.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Статья посвящена разработке подхода к оценке вероятностей возникновения аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях. Предлагается давать такую оценку, основываясь на предположении о степенном распределении аварийных событий на этих предприятиях. На основе распределения Парето даны оценки интервала повторения катастрофических аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях и числа людей, которые могут в них пострадать

Как известно, нефтеперерабатывающие, нефтехимические и химические заводы являются одними из наиболее опасных видов производств: на них производится, перерабатывается, хранится, транспортируется большое количество опасных веществ, расположены такие заводы, как правило, вблизи крупных населенных пунктов и т.п. Кроме того, для этой отрасли характерна высокая концентрация производства, что лишь увеличивает создаваемую ими потенциальную техногенную опасность.Одной из важных задач при обеспечении промышленной безопасности в нефтепереработке, химии и нефтехимии является проведение анализа безопасности эксплуатации производства, который подразумевает и оценку вероятности аварий на этих предприятиях. В настоящее время имеется большой разброс в подходах к такого рода оценкам, что связано со слабой изученностью данного вопроса.

Для поиска ответа на вопрос о том, как же оценивать вероятности аварий на нефтеперерабатывающих (нефтехимических) и химических заводах, обратимся к степенным законам распределения вероятностей.

1. Степенные законы распределения вероятностей

Многие сложные системы отличает возможность их описания степенными законами распределения вероятностей /1/. То есть статистические характеристики происходящих в них событий обыкновенно имеют плотность вероятности вида

$$p(x) \approx x^{-(1+\alpha)}, \tag{1}$$

где показатель α обычно лежит в диапазоне от нуля до единицы. При статистическом описании катастроф и стихийных бедствий распределение (1) является правилом, практически не знающим исключений /1/. В качестве классического примера можно привести закон Рихтера-Гутенберга: зависимость количества землетрясений от их энергии определяется формулой (1) с $\alpha \approx 2/3$ для землетрясений с магнитудой менее 7,5 и с $\alpha \approx 1$ для более сильных /2/.

Точно также распределены: относительная смертность в результате землетрясений $\alpha \approx 0{,}25\ldots0{,}45$, ураганов $\alpha \approx 0{,}4\ldots0{,}6$, а также наводнений и торнадо $\alpha \approx 1{,}4$ /3/; число заболевших $\alpha \approx 0{,}29$ при эпидемиях в изолированных популяциях /4/; площадь лесных пожаров $\alpha \approx 0{,}59$ /5/; колебания биржевых индексов $\alpha \approx 1{,}40$ /6/; масса снежных лавин /7/. Степенное распределение имеют характеристики и многих других явлений, как связанных с катастрофами и риском, так и не имеющих к ним прямого отношения, например, динамики солнечных вспышек /7/ или научной продуктивности исследователей (число публикаций) /8/.

Вообще, степенные законы являются непременным проявлением сложности /1/. Для простых систем наиболее типичны экспоненциальное

$$p(x) \approx e^{-\lambda x} \tag{2}$$

и нормальное (гауссово)

$$p(x) \approx e^{\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \qquad (3)$$

распределения. Первое описывает поведение «элементарных» объектов, второму распределению подчиняются величины, получающиеся при сложении большого числа независимых случайных слагаемых, поэтому для сложных систем (если понимать их как состоящие из большого числа элементов) можно было бы ожидать именно гауссовой статистики. Однако, как показывают приведенные выше примеры, это зачастую не так.

Разница между нормальным и степенным распределениями носит не формальный, а принципиальный характер. Если статистика системы описывается формулой (3), то свыше 99,7% событий отклоняется от среднего значения m не более чем на 3σ (т.н. правило трех сигм), а, скажем, за 5σ выбивается и вовсе менее одного события на миллион. При этом появляется возможность вполне обоснованно пренебречь очень крупными событиями, считая их практически невероятными, т.е. можно отрезать хвост распределения.

Статистика величин, описываемых распределением (1), отличается тем, что крупные события, приходящиеся на хвост распределения, происходят недостаточно редко, чтобы ими можно было пренебречь. По этой причине степенные законы распределения вероятностей называют также распределениями с тяжелыми хвостами (heavy tails или fat tails). Распределения вида (2) или (3), имеющие хвост, спадающей быстрее любой степени x, в этой связи уместно именовать компактными, подразумевая небольшую протяженность диапазона значений, принимаемых случайной величиной со сколько-нибудь значимой вероятностью.

В терминах оценки безопасности и риска хвост распределения соответствует так называемым гипотетическим авариям, возможность которых, как это явствует уже из самого названия, на практике не учитывается. Наличие степенных законов распределения вероятностей в корне подрывает существовавшие до последнего времени представления о надежности и риске. Эти представления базируются на явном, а чаще всего неявном, предположении, что серьезные неприятности происходят исключительно в результате неблагоприятного стечения ряда обстоятельств, т.е. что любое крупное событие возникает как сумма большого числа мелких независимых событий, которая в силу центральной предельной теоремы нормально распределена /9/.

Природа степенных законов распределения (а, в конечном итоге, и катастроф) связана с сильной взаимозависимостью происходящих событий. Но это даже не «эффект домино», когда упавшая костяшка с некоторой близкой к единице вероятностью сшибает следующую, та еще одну и т.д. В этом случае распределение числа упавших костяшек имело бы вид (2) и все равно убывало бы с ростом *x*. К возникновению степенных законов распределения вероятностей приводит «цепная реакция», т.е. лавинообразное нарастание возмущения с вовлечением в события все большего количества ресурса.

Нефтеперерабатывающий (нефтехимический, химический) завод, безусловно, является сложной системой со множеством элементов и количеством связей между ними. Сделаем предположение о возможности описания распределения вероятностей аварийных событий на этих предприятиях с использованием степенного закона распределения вероятностей.

Простейшим распределением, имеющим тяжелый хвост, является так называемое распределение Парето /1/, для которого функция распределения $F(x)=\text{Prob}\{\zeta < x\}$, определяющая вероятность того, что соответствующая случайная величина принимает значение, меньшее *x*, задается соотношением

$$F(x) = \begin{cases} 1 - x^{\alpha}; & x \geq 1 \\ 0 \quad ; & x < 1 \end{cases}, \quad \alpha > 0. \tag{4}$$

Соответственно, плотность вероятности

$$\varphi(x) = F'(x) \approx x^{-(1+\alpha)} . \tag{5}$$

Особенность, связанная с такими распределениями, состоит в том, что моменты достаточно высокого порядка

$$M_q = Ex^q = \int x^q dF(x) \tag{6}$$

у них расходятся:

$$M_q = \infty \text{, если } q \geq \alpha . \tag{7}$$

Для распределения Парето с $\alpha \leq 1$ бесконечно уже среднее $M_1 = \infty$. Очевидно, что на расходимость моментов влияет только тяжелый хвост распределения, «перевешивающий» голову, описывающую вероятность наиболее частых, но небольших событий. Вид «готовы» при этом оказывается не очень существенным, а решающую роль играет только асимптотика хвоста.

Один из общих подходов к обработке положительных величин, имеющих распределения с тяжелым хвостам, состоит в переходе от наблюдаемых величин x_i к их логарифмам $y_i = \ln x_i$. В случае степенного убывания хвостов с любым показателем степени величины y_i уже будут иметь все статистические моменты, таким образом, к ним можно применять стандартные методы статистической обработки. Методика оценки параметров устойчивых законов (в том числе и устойчивых законов с тяжелыми хвостами) изложена в работе /10/.

Следует отметить два недостатка этого подхода. Во-первых, переход к логарифмам часто приводит к асимметричным распределениям, которые медленно сходятся к гауссову закону. А во-вторых, и это гораздо важнее, если нас интересует суммарный эффект S_n, то переход к логарифмам не поможет, ибо связать поведение S_n и $\ln x_1 + \ln x_2 +\ldots+ \ln x_n$ в общем случае очень трудно /1/.

Будем считать, что в нашем случае хвост распределения удовлетворительно описывается степенной зависимостью при x, превышающем некоторый известный порог x_0. При этом не обязательно, чтобы это приближение выполнялось для всего диапазона наблюдаемых значений, достаточно, чтобы оно выполнялось для хвоста распределения, т.е. при $x>x_0$. Действительно, для распределений с тяжелыми хвостами основной вклад в суммарный эффект S_n вносят наибольшие наблюдения. Поэтому указанное пороговое ограничение не скажется заметно на оценке вероятностных характеристик сумм S_n при достаточно больших значениях n. После перенормировки на известное значение порога можно считать, что нормированные величины x/x_0 имеют распределение Парето (4).

Оценка максимального правдоподобия $\hat{\alpha}$ для параметра α имеет вид /1/:

$$\hat{\alpha} = \left[\frac{1}{n} \sum \ln(x_i / x_0) \right]^{-1}. \qquad (8)$$

В качестве разброса этой оценки можно взять стандартное отклонение /1/:

$$\sigma_\alpha = \hat{\alpha} / \sqrt{n}\,. \qquad (9)$$

Определение характерного периода повторяемости максимально возможных катастроф может быть проведено на основе каталогов катастроф длительностью больше периода их повторяемости либо физически (или экономически) обоснованных ограничений на величину возможных бедствий. Однако оба эти подхода не дают пока удовлетворительного результата /1/.

Действительно, временной период существования крупных нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств исчисляется лишь несколькими десятками лет. При этом постоянно строятся новые производства, появляются новые процессы и вещества. Следовательно, даже накопленная статистика уже является мало информативной. Период повторяемости таких событий, как аварии в Севезо (Италия) или в Бхопале (Индия), точно назвать весьма затруднительно. Что качается физически или экономически обоснованных пределов возможной силы катастроф, то единственно несомненные из них связаны с ограниченностью размеров нашей планеты. В связи с этим, для описания потерь от аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах рассмотрим усеченное распределение Парето с функций распределения /1/

$$\mathrm{F(x)} = \begin{cases} 1;\ x > x_0 \\ \dfrac{1-x^{-\alpha}}{1-x_0^{-\alpha}};\ 1 \le x \le x_0 \\ 0;\ x < 1 \end{cases}. \tag{10}$$

Точку усечения x_0 оцениваем, исходя из выборки x_1, x_2, ...x_n. В работе /11/ для оценки параметра x_0 получена несмещенная оценка $\hat{x}_0$, имеющая максимальную дисперсию среди всех несмещенных оценок. Она имеет вид:

$$\hat{x}_0 = m_n + \frac{1}{n\beta(m_n/m_0)} \pm \frac{1}{n\beta(m_n/m_0)}, \tag{11}$$

где $\beta(x/x_0) = F'(x/x_0)$ - плотность вероятности. Подставив в (11) усеченный закон Парето (10), получим:

$$\hat{x}_0 = m_n + \frac{m_n^{1+\alpha}}{n\alpha} \pm \frac{m_n^{1+\alpha}}{n\alpha}. \tag{12}$$

В качестве приближенной оценки точки перелома, где нелинейный эффект роста суммарного эффекта сменяется линейным, можно взять следующее значение n^* /1/:

$$n^* = 1{,}5\ln 2 \cdot x_0^{\alpha} \cong x_0^{\alpha}. \tag{13}$$

Переходя к оценкам параметров, получим /1/:

$$n^* = \hat{x}_0^{\hat{\alpha}} = \left(m_n + \frac{m_n^{1+\hat{\alpha}}}{n\hat{\alpha}} \right)^{\hat{\alpha}}, \tag{14}$$

где m_n максимальное значение x из выборки.

Отметим ненадежность практических оценок параметров α и n^* из-за малочисленности данных в области больших значений /1/. Тем не менее, даже если стандартное отклонение величины n^* имеет порядок самой величины, такая оценка все же несет грубую информацию о диапазоне значений n, в котором плотность вероятности убывает гораздо круче, чем для умеренных значений.

2. Оценка вероятностей аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях

Сформированная по материалам журнала «Безопасность труда в промышленности» и официального сайта информационного агентства РИА «Новости» выборка насчитывает 36 аварий различного масштаба на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах за последний 31 год. Распределение числа пострадавших (погибших) в авариях за этот период представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение числа пострадавших от аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах за период 1974-2005 годы

Число пострадавших	1	2	3	4	6	7	9	10	12	13	22	26	55	70	90	100	130	200	300	706	200 000
Число аварий (всего 36)	2	6	6	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Как видно из таблицы 1, среднегодовое значение числа пострадавших в результате аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах крайне неинформативно и не дает никакого представления о возможных масштабах отдельных аварий. Причиной этому служит тяжелый хвост распределения – авария в индийском Бхопале, в которой пострадали порядка 200 тыс. человек, из них 3150 человек погибли.

Построенная по результатам составления таблицы 1 кумулятивная гистограмма числа погибших и пострадавших в авариях на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах в 1974-2005 годах представлена на рисунке 1.

На рисунке 1 по оси абсцисс отложен десятичный логарифм числа пострадавших, по оси ординат – десятичный логарифм количества аварий, для которых число пострадавших больше данного аргумента x. Прямая линия – закон Парето с $\hat{\alpha}$=0,4872.

На рисунке 2 представлена плотность распределения вероятностей как зависимость от числа пострадавших в авариях на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах в 1974-2005 годах.

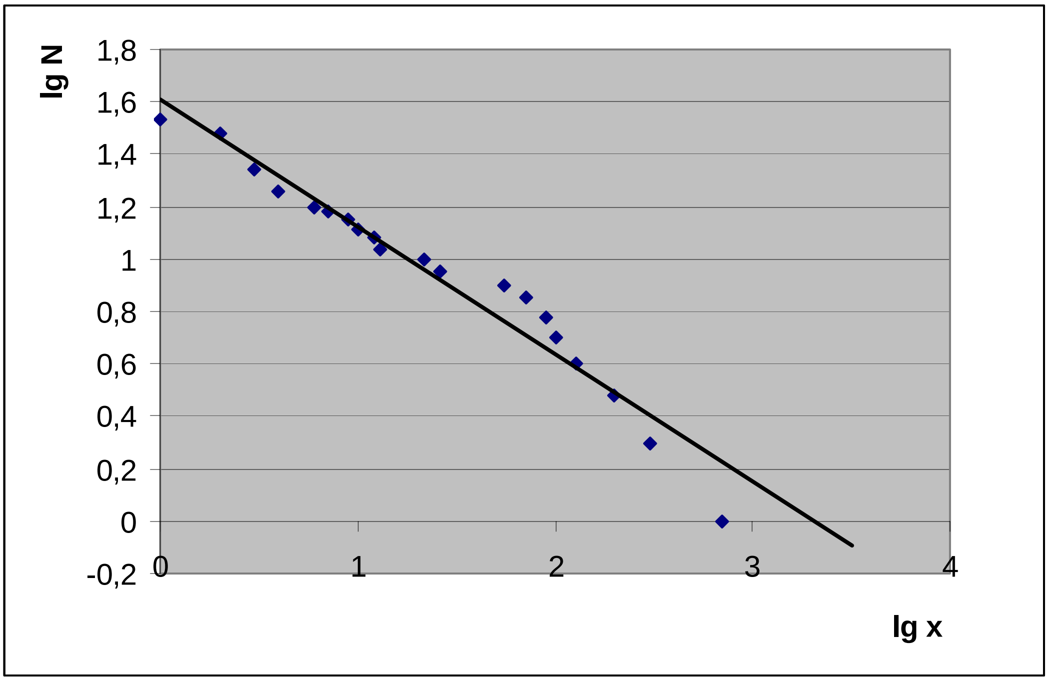

Рисунок 1 - Кумулятивная гистограмма числа погибших и пострадавших в авариях на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах в 1974-2005 годах

По (8) получаем значение оценки $\hat{\alpha} = 0{,}4013$. Отклонение оценки по (9) σ_α = 0,067. Как видим, полученное графически значение оценки параметра α несколько превышает отклонение σ_α, хотя в целом мало отличается от полученного по (8) и (9) значения.

Величину n^* можно условно назвать «интервалом повторения сильнейших возможных событий» /1/. Для числа людей, пострадавших от аварий на нефтехимическом, химическом производстве, была получена по (14) оценка n^* = 341. Была получена оценка интервала повторения сильнейших событий T^*=255±137 лет. Оценка x_0 по (12) имеет вид $\hat{x}_0$= (2,1±1,85).10^6 человек.

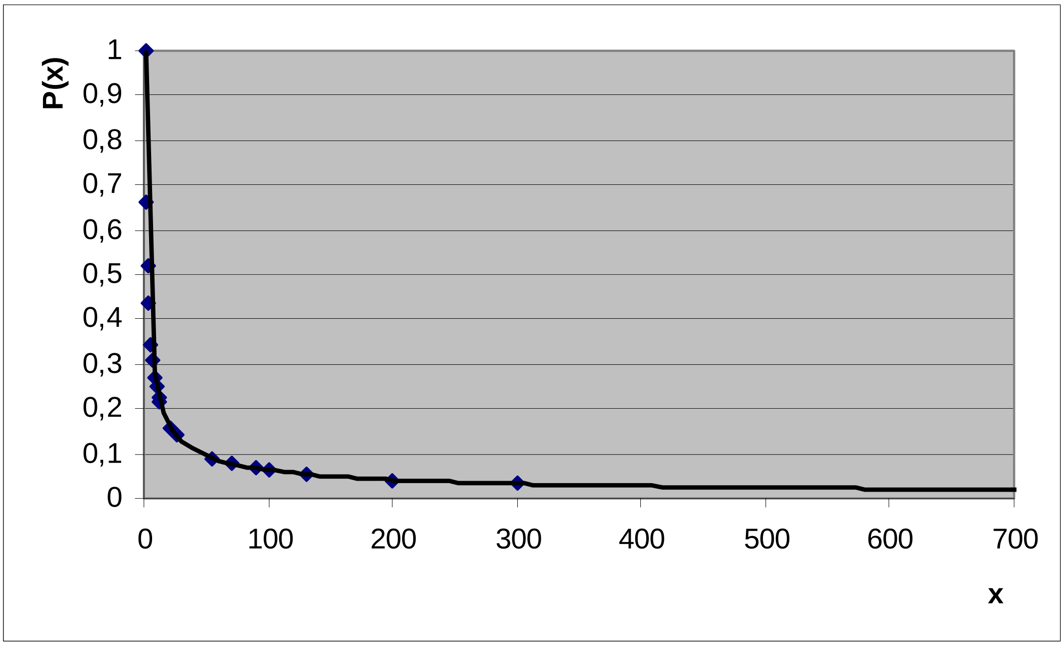

Рисунок 2 - Плотность распределения вероятностей (для аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производствах в 1974-2005 годах)

Таким образом, несмотря на определенную погрешность в расчетах, обусловленную многими причинами, основные из которых были уже упомянуты выше, можно сказать, что авария с ущербом в 2,1 млн пострадавших повторяется в среднем раз в 255 лет. Однако эта оценка дана, в частности, без учета роста объема производства во всем мире в будущем. Также возможно влияние и других факторов, многие из которых на сегодняшний день, по всей видимости, нам еще не известны.

При анализе промышленной безопасности конкретного производства целесообразно исходить из предположения о степенной зависимости распределения вероятностей возникновения аварий, взяв за основу усеченное распределение Парето, а в качестве интервальных оценок возможных значений периодов повторения аварий и количества пострадавших в них людей использовать полученные выше результаты.

Можно предположить, что полученные во многих декларациях промышленной безопасности значения вероятностей возникновения аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях являются некорректными по причине наличия многих неопределенностей при анализе уровня их промышленной безопасности. Поэтому, в силу большой сложности прогнозирования возникновения аварий на конкретном производстве, целесообразно в декларациях промышленной безопасности давать оценку аварийности в целом по отрасли, построенную на приведенном в данной главе подходе к вычислению вероятностей аварий.

Выводы

1 Предложено описывать промышленные аварии с катастрофическими последствиями распределениями с тяжелыми хвостами, в частности, усеченным распределением Парето.

2 Собрана и проанализирована доступная статистика аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях за последние 30 лет. Сделано предположение о степенной зависимости вероятностей реализации аварий.

3 Была получена оценка интервала повторения сильнейших событий (аварий с катастрофическими последствиями) на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях, которая составила T^*=255±137 лет. Оценка числа пострадавших x_0 имеет вид $\hat{x}_0$= (2,1±1,85)$\cdot 10^6$.

Литература

1. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Салов С.С. и др. Управление риском. – М.: Наука, 2000. – 431 с.

2. Голицын Г.С. Землетрясения с точки зрения теории подобия //ДАН. – 1996. Т.346, №4. – С. 536-539.

3. Reduction and predictability of natural disaster // Eds. J.B.Rundle, D.L.Turcotte, W.Klein/ Proceedings of the workshop "Reduction and predictability of natural disaster" held January 5-9, 1994 in Santa Fe, new Mexico. – 1995.

4. Rhodes C.J., Anderson R.M. Power laws governing epidemics in isolated populations // Nature. 1996. V.381. P.600-602.

5. Turcotte D. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge Univ. Press, 1997 (Second Edition).

6. Mantegna R.N. Stanley H.E. scaling behavior in the dynamics of an economic index // Nature. 1995. V.376. P.46-49.

7. Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality. – Springer-Verlad New York, Inc. 1996 – 205 p.

8. Яблонский А.И. Математические модели в исследовании науки. – М.: Наука, 1986. – 352 с.

9. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т.2. - М.: Мир, 1967. – 752 с.

10. Золотарев В.М. Одномерные устойчивые распределения /Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1983. – 304 с.

11. Писаренко В.Ф. О наилучшей статистической оценке максимальной возможной магнитуды землетрясения //ДАН, 1995.- Т. 344, №2. – С. 237-239.