

References

1. *Tursunbaeva A.K., Portnov V.S. et al.* Thermodynamics of crushing of ore at compact leaching metals. Parts I-III // Bulletin ENU named after L.N.Gumilev. Naturally-engineering science. — 2010. — № 4 (77). — P. 49–80.
2. *Norov Yu. D., Chemetova P.A.* Chisel explosive works. — Tashkent: Fan, 2005. — 220 p.
3. *Selivanov V.V., Novikov S.A., Kobylkin I.F.* Explosive of technology. — M.: MGTU named after Bauman, 2008. — 648 p.
4. *Norov Yu. D., Turaev A.S., Kodirov F.A.* Physical and chemical methods of easing of durability of rocks. — Tashkent: Fan, 2007. — 224 p.
5. *Sobolev G.A., Ponamarev A.V.* Physics of earth quakes and harbingers. — M.: Nauka, 2003. — 270 p.
6. *Sobolev G.A.* Bases of the forecast of earth quakes. — M.: Nauka, 1993. — 313 p.
7. *Vorobev A.E., Portnov V.S. et al.* Infiltration the cyanic a solution through porous ore. I. The general consideration // The International magazine applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 82–88.
8. *Kutuzov B.N.* Method of conducting explosive works. P. 1. Destruction of rocks by explosion. — M.: Mountain book, 2009. — 471 p.
9. *Kuznetsov V.M.* Mathematical models of explosive business. — Novosibirsk: Nauka, 1977. — 267 p.
10. *Portnov V.S., Tursunbaeva A.K., Puzeeva M.P. et al.* Thermodynamics and heat conductivity of minerals // Regional bulletin of the East. — 2009. — № 2. — P. 14–18.
11. *Bulah A.G., Bulah K.G.* Physical and chemical properties of minerals and components of hydrothermal solutions. — L.: Nedra, 1978. — 167 p.

УДК 622.34

К вопросу о методике оценки опасностей и аварийности технологических процессов

To the question about methodology of estimation of dangers and accident rate of technological processes

Харьковский В.С.¹, Плотников В.М.², Дрижд Н.А.¹, Шарипов Н.Х.¹,
Какенов К.С.², Комлева Е.В.¹, Харламова А.В.¹

¹Карагандинский государственный технический университет;

²Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза (E-mail: sattu55@mail.ru)

Мақалада Қарағанды өңіріндегі шахталардың деректер негізінде тексерілген технологиялық үдерістердің апаттылығы мен қауіптерді бағалаудың авторлық әдістемесі ұсынылады. Онда апаттар санының серпіні мен олардың қайталанғыштығы косинусоида заңына бағынышты екендігі көрсетілген. Әр түрлі бастапқы деректер үшін есептелген тәуелділіктер мен қауіпті оқиғалардың нақты параметрлерін (көрсеткіштерін) талдау негізінде қауіпті ахуалдар мен қауіпті оқиғалардың жиілік шамалары арасындағы сызықсыз байланысының бар екендігі туралы қорытынды жасалған. Ұсынылған әдістеме инженерлік есептеулер мен болжамдар үшін пайдалы. Теориялық алғышарттардың дұрыстығы тәжірибелік зерттеулер нәтижелерімен дәлелденді.

The authorial methodology of estimation of dangers and accident rate of technological processes, tested on the basis of these mines of the Karaganda region, is offered in the article. It is shown that the dynamics of number of accidents and their repetition submit to the law of cosine. On the basis of analysis of calculation dependences and concrete calculations of parameters of hazardous occurrences for different basic data a conclusion is done about the presence of nonlinear connection between the sizes of frequencies of near-accidents and hazardous occurrences. The offered methodology is suitable for engineering calculations and prognosis. The rightness of the theoretical premises was confirmed by the experimental researches.

Безопасность труда в промышленности достигается путем осуществления комплекса мероприятий на основе технического перевооружения отрасли, широкого внедрения средств комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, снижения трудоемкости работ, повышения уровня обученности работающих при ведении технологических процессов, что отвечает требованиям МОТ и национальной политике РК в области безопасности и охраны труда. Поскольку главным объ-

ектом охраны труда является безопасность работника, то необходимо рассмотреть исполнительную деятельность оператора по планируемым и фактическим показателям техногенного риска технологического процесса и операций.

Данный критерий определяет меру опасности и характеризует возможность возникновения аварии и тяжесть ее последствий. Следовательно, количественные и качественные параметры безопасности труда целесообразно выразить математическим ожиданием ущерба при функционировании производственного объекта.

Теория и практика оценки антропогенных производственных факторов позволяют констатировать, что вероятностные методы обосновывают оптимизацию предлагаемых мер безопасности и применимы в инженерных расчетах [1–4]. К основным критериям оценки относят коэффициент частоты, коэффициент тяжести и коэффициент потерь [4].

Существующие наработки по обеспечению безопасности работ в техносфере позволяют выделить три области, которые определяют условия труда на производстве: степень совершенства технологических решений принятых инженерных разработок, исполнительная деятельность работника, техническое состояние машин и агрегатов. С позиции теории множеств совместная область, характеризующая фактическую производственную безопасность объекта, определяется коэффициентом производственной безопасности (надежности системы), рассчитываемым по следующей зависимости [3]:

$$Кб = Кп.р \cdot Ки.Д \cdot Кб.м., \quad (1)$$

где Кб — коэффициент производственной безопасности; Кп.р — коэффициент соответствия проектных решений принятых инженерных разработок; Ки.Д — коэффициент исполнительской деятельности работников; Кб.м — коэффициент технической безопасности машин и установок технологического цикла.

Противоположная величина надежности работы системы является риском, который характеризует меру опасности:

$$R = 1 - R_T. \quad (2)$$

Поскольку риск — это образ действия в условиях неопределенности [5], то меру опасности следует производить с помощью показателей [6]:

- прогнозируемого ущерба;
- степени вывода из проектного состояния промышленного объекта;
- ожидаемого объема потерь хозяйствующими объектами выпускаемого товара.

При рассмотрении данных критериев как количественной оценки опасности в качестве признака идентификации необходимо рассматривать временной интервал простоя объекта или возможные материальные потери.

Риск следует понимать как величину вероятности опасного события или как удельную частоту опасного события по отношению к единичному объекту исследуемой техногенной сферы или к объектам опасности (к человеку или к фиксированной группе людей). Для отдельного человека важным является оценка риска за период трудового стажа (масштаб времени) в данном производстве. Меру безопасности можно оценить устойчивостью объектов и субъектов к опасным событиям — надежностью оценки исполнения обязанностей, оговоренных трудовым договором.

Возникновение чрезвычайных ситуаций обусловлено наличием остаточного риска. В соответствии с концепцией остаточного риска абсолютную безопасность обеспечить невозможно. Поэтому принимается такая безопасность, которая может обеспечить безопасность производства на данном этапе развития функционирования предприятия. Вероятность (P) наступления определенного сочетания нежелательных событий определяется выражением

$$R = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (3)$$

При этом величина приемлемого риска характеризует:

- а) надежность оборудования, процесса и обслуживающего персонала;
- б) возможность возникновения нештатных аварийных ситуаций;
- в) наличие и совершенство мониторинга;
- г) предупреждение и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций.

Анализ накопленной информации по статистике аварий свидетельствует, что динамика их числа и повторяемость подчиняются закону косинусоиды и представлена в виде трех компонент [1, 2]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n j_i f_i(t) + \sum_{j=1}^n j_j f_j(t) + \sum_{\theta} j_{\theta} f_{\theta}(t), \quad (4)$$

где $i, j\theta$ — индексы, которые относятся к рассматриваемым критериям допустимого (приемлемого) риска на стадии приработки, проектной эксплуатации, износа. Основной характеристикой признака безаварийного функционирования системы является вариация, которая характеризуется отношением среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию, т.е:

$$\text{var}(t) = \frac{\sqrt{D}}{\bar{x}},$$

где D — дисперсия признака; x — математическое ожидание (среднее значение наблюдаемого признака).

Системный подход к концепции формирования происшествия в сфере безопасности с учетом количества объектов или субъектов по спектрам их категорий представляется следующим образом [3]:

а) работа системы

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

где $e^{-\lambda}$ — риск (надежность) работы; λ — интенсивность; t — время регистрации отдельного события;

б) стационарность процесса (принцип неопределенности Гренандера)

$$\lambda t = \text{const}; \quad (7)$$

в) разделение процесса на уровни (процессы) функционирования

$$k = 1-3,321 \text{ gn}; \quad (8)$$

г) вероятность проявления определенного признака

$$P_A(t) = \frac{M(x)}{D(x)}, \quad (9)$$

где $P_A(t)$ — вероятность анализируемого события; $M(x)$ — математическое ожидание.

Выделение аномального значения определяется как

$$\tau = |x_i| - M(x) / \sqrt{D_x},$$

$$\tau \leq \tau_{h-p}$$

где x_i — предельный элемент выборки; τ_{h-p} — табличное значение, вычисленное при доверительной вероятности (p — процентная точка нормированного выборочного отклонения).

Табличное значение доверительной вероятности принимается из условий числа степеней свободы анализируемого массива исходных данных и того, что значения прогнозируемых квантилей находятся в пределах 0,001. Применительно к условиям, когда аварийная ситуация разбита на 8 категорий, что отвечает правилу Штюргеса, критерияльное число составляет 6,859, что соответствует условиям современной концепции безопасности [4, 7].

Анализ расчетных зависимостей и конкретные расчеты параметров опасных событий для различных исходных данных приводят к некоторым общим выводам о связи между величинами частот опасных ситуаций и опасных событий. Между этими явлениями имеется нелинейная связь, которая существенно зависит от вида опасностей и прогнозируемого ЧП.

Доминантой всего подхода к вероятностной составляющей является регулирование зависимости и вероятности ущерба, которое требует конкретных прогнозных значений. Как показали проведенные исследования, коррекцию можно провести, используя формулу Байеса, которая позволяет произвести переход от аварийной ситуации к оценке общей вероятности события [1] и характеризует связь между ситуациями как экспоненциальную и гиперболическую, что подтверждено конкретными данными для ряда отраслей хозяйствования. При этом коррекцию перехода к иному масштабу анализа качественной характеристики аварийности следует производить как декремент функции затрат, а количественная характеристика анализируемого класса уточняется показателем математического ожидания на начальный период функционирования и старения. Коррекция обязательна при риске профессиональной патологии более 0,01, а также изменении стажа операторов по отношению к оптимальному с учетом поправок на фактическое состояние тяжести и напряженности труда (ССБТ, ГОСТ 12.1.005).

Приведенные закономерности позволяют спрогнозировать масштабность техногенной чрезвычайной ситуации на основе периодичности событий их возникновения и возможного экономического ущерба (см. табл.).

За основу взяты сведения о масштабности ЧС, представленные в Интернете (www.CATALQG.Ajaon.kz), а вероятность риска рассчитана на основе принципа неопределенности Гренандера и предложенной нами закономерности.

Сведения о масштабности ЧС техногенного характера

Масштаб чрезвычайной ситуации	Периодичность возникновения	Продолжительные последствия		Вероятность риска
		Экономический ущерб, долл. США	Количество пострадавшего населения, чел.	
Глобальный (планетарный)	Чрезвычайные ситуации техногенного характера, кроме полномасштабной мировой войны, неизвестны			$1,8 \cdot 10^{-10}$
Транснациональный (межгосударственный, континентальный)	30–40 лет	1–10 млрд.	10 тыс.–2 млн.	$2 \cdot 10^{-10}$
Национальный	10–15 лет	100 млн.–1 млрд.	1–100 тыс.	$7 \cdot 10^{-10}$
Межрегиональный	5–18 лет	До 100 млн.	До 50 тыс.	$7 \cdot 10^{-10}$
Региональный	1–5 лет	10–100 млн.	1–10 тыс.	$3,6 \cdot 10^{-9}$
Местный	1–6 месяцев	1–10 млн.	10–1000	$1 \cdot 10^{-8}$
Объектный	1–30 дней	100 тыс.–1 млн.	1–100	$2 \cdot 10^{-6}$
Локальный	Ежедневно	До 100 тыс.	До 10	$6 \cdot 10^{-3}$

Корректировка вероятностей риска произведена с учетом масштабности чрезвычайных ситуаций техногенного характера оценкой на основе кривой Фармера, что позволяет принять ее в качестве математического ожидания рассматриваемого класса для любых отраслей хозяйствования и соответственно оценить уровень масштабности ЧС на предприятии на основе сведений по показателям травматизма, тяжести и потерь с учетом экономических затрат на мероприятия по охране труда.

Особенностью аварийности технологических процессов и процессов травматизма является то, что характеристики описываются как функции времени, при этом определенная группа вероятностных характеристик инвариантна во времени, т.е. является характеристикой данного периода.

Это позволяет рассматривать анализируемые явления как стационарные, с использованием их эргодических особенностей, заключающихся в том, что вероятностные характеристики могут быть получены с вероятностью, близкой к единице, в результате операции усреднения по одной реализации при достаточно большой длительности отрезка времени.

Среднее значение случайного процесса по ансамблю реализаций характеризуется его математическим ожиданием, которое для стационарных процессов не зависит от времени и представляет постоянное число. Дисперсия для стационарного эргодического случайного процесса является также постоянным числом. Необходимо отметить и тот факт, что для стационарных и эргодических случайных процессов корреляционная функция может быть определена по одной реализации процесса [2].

Рассматриваемые явления аварийно-технологического процесса представляют редкие события. Функциональная зависимость, описывающая анализируемое событие, представляет экспоненту и отвечает условиям распределения Пуассона.

Принцип неопределенности Гренандера постоянными значениями анализируемого частотного ряда можно представить следующим образом:

$$\Delta f T = \text{const}, \quad (10)$$

принимая во внимание, что ожидаемая среднеквадратичная ошибка измерения спектральной плотности полосы спектра определяется величиной

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2T\Delta f_{\text{ш}}}}, \quad (11)$$

где T — средняя наработка на отказ; Δf — частотность; $\Delta f_{\text{ш}}$ — частотность, эквивалентная полосе избирательного фильтра.

Принцип неопределенности Гренандера характеризуется постоянной, равной дисперсии измерений или наблюдений, которая определяет условия принятия эксперимента к рассмотрению или оценки аварийного состояния:

$$A = \frac{1}{2\varepsilon^2}, \quad (12)$$

т.е. применительно к полосе исследования спектра погрешность оценки аварийности является ее константой, определяемой условиями ведения технологического процесса.

Для начального участка (условия формирования опасности) оценку зависимости периода приработки можно оценить математическим ожиданием, представляющим собой среднеарифметическое значение рассматриваемого временного участка, соответствующее прогнозной продолжительности наработки на отказ периода:

$$m^* = \frac{1}{2}[x(0) + x(T)], \quad (13)$$

где m^* — математическое ожидание данной величины. Временной параметр формирования чрезвычайной ситуации определяется отношением [2]

$$\frac{F(x)}{F'(x)} \approx T, \quad (14)$$

где $F(x)$ — функция и ее соответствующие производные, что соответствует

$$\frac{F'(x)}{F''(x)} \approx T. \quad (15)$$

При условии правильности оценки временного периода анализируемого явления

$$\frac{F(x)}{F'(x)} \approx \frac{F'(x)}{F''(x)}. \quad (16)$$

Применительно к рассматриваемым вероятностным значениям анализируемых процессов вероятность определяется как отношение квадрата плотности распределения значений массива к его дисперсии (квадрату среднеквадратичного отклонения).

Мерой точности для зависимости (16) является условие определения оценки второй производственной функции, поскольку, согласно неравенству Каши, имеем [2]:

$$\|f\| = \sqrt{\int_a^b f^2(x) dx}, \quad (17)$$

где $\|f\|$ — норма функции, которая оценивается, согласно теории статистики, фиксированным значением среднеквадратичного отклонения.

Как и любой стахиостатический процесс, техногенная ситуация подлежит оценке ее воздействия на рабочее пространство, оператора и требует определенной коррекции при ее рассмотрении, что позволяет воспользоваться методом декомпозиции (разбиения) анализируемого процесса на зоны упреждения, ожидания и глобального усреднения, которые определяют ее как тяжесть труда, травматизм, аварийность. Данные факторы зафиксированы как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях и увязываются со снижением производительности труда, аварийностью и травматизмом. Так, федеральное законодательство США требует учета возможности травматизма по косвенным факторам, в том числе по снижению производительности труда. В странах СНГ большинство аварий трех категорий представляет нарушения технологического процесса, связанные с количеством и качеством выпускаемой продукции:

I. чрезвычайная ситуация, сопровождающаяся применением защитных устройств, индивидуальных защитных средств, не снижающих производительности труда. Ее можно отнести к зоне упреждения стахиостатического процесса, и решение сводится к управлению техпроцессом;

II. зона аварийности (зона чрезвычайного происшествия) соответствует ожиданию стахиостатической ситуации, что отвечает условиям травматизма и аварийности, сопровождающейся катастрофическими последствиями;

III. зона катастроф соответствует максимальным нарушениям условий труда, связана с максимальными нарушениями технологического процесса и сопровождается людскими, материальными и финансовыми потерями. Данная зона соответствует условиям зоны глобального усреднения.

Аварийность целесообразно описывать распределением Юла-Фарри, имеющим следующий вид при $n = 1, 2, 3$:

$$P_n(T) = \{e^{-\lambda\tau(1-e)^{(-\lambda\tau)^{n-1}}}\}. \quad (18)$$

Поскольку степень нарушения технологического процесса выражается по абсолютной величине долей ее отклонения от прогнозного значения, то вероятность этого события, согласно правилу Чебышева, оценивается соотношением

$$P|(x - m) < \varepsilon| \geq 1 - \frac{D}{\varepsilon^2}. \quad (19)$$

Следовательно, ошибки интерполяции участка определяются соотношением

$$\varepsilon^2 = (\text{var})^2 = \frac{\|f\|^2 - m^2}{(m')^2} \quad (20)$$

и выражают предельную вариацию признаков исследуемого явления (события) или оценочный уровень сертификации (надежности события) [1, 6].

Полученные закономерности являются зависимостями расчета параметров риска проведения технологических процессов по их аварийности и характеризуют надежность функционирования технической системы.

Проверку приведенной методики мы провели на основе данных травматизма шахт Карагандинского бассейна. Из 330 несчастных случаев 30 сопровождалось серьезными повреждениями, в том числе один представлял тяжелый случай. И это свидетельствует, что шахты Караганды, с учетом срока их эксплуатации, работают в режиме деградации.

Наличие или комбинация трех факторов в течение этого периода могут привести к катастрофическим последствиям, о чем свидетельствуют сведения о степени тяжести воздействия, определенные на основании пирамиды Дюпоне [5].

Все это позволяет констатировать, что предлагаемая методика пригодна для инженерных расчетов и прогноза.

References

1. Gnedenko B.V., Belyaev U.K., Solovov A.D. Mathematical methods are in the theory of reliability. — M.: Nauka, 1965. — 524 p.
2. Mirskii G.Y. Apparatus determination of descriptions of casual processes. — M.-L.: Energy, 1967. — 432 p.
3. Kharkovskii V.S., Plotnikov V.M. et al. Application of methods of theory of chances and theory of reliability in calculations on determination of parameters of traumatism and degree of dangers on the objects of management // Materials second International scientifically to the practical conference «World scientific potential-2005». — Vol. 17. Engineering sciences. — Dnipropetrovsk, 2005. — P. 28–33.
4. Kharkovskii V.S., Plotnikov V.M. et al. Authentication of risk with the purpose of determination of expense terms on insurance of workers of enterprise // Risks is in the modern world: identification and defence. Materials of VIII of the International scientific reading of the International academy of sciences of ecology and safety of vital functions. — S-Pb, 2004. — P. 2–35.
5. Kharkovskii V.S., Demin V.F., Demina T.V. To the question of determination of statistical indexes of spectrum of descriptions of casual processes on the basis of traumatism // Materials second International scientifically to the practical conference « World scientific potential-2005». — Vol. 17. Engineering sciences. — Dnipropetrovsk, 2005. — P. 50–52.
6. Methodical guidance as evaluated by a degree on main oil pipelines. Leading document of \ Scientifically technical center on safety in industrial State supervision of Russia. Version 27. Declaration of industrial safety and risk estimation. Producing 1. — M.: State enterprise, 2000. — 95 p.
7. Klebanov F.S. About modern conception of safety. — M.: MSTU, 2002. — P. 191–196.