

УДК 614.8.084:517.8

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ****Серeda С.Н.**

*Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» Муром, e-mail: sereda-2010@mail.ru*

Целью работы является анализ эффективности стратегий обеспечения требуемого уровня безопасности и снижения риска возникновения происшествий, определяемых экономическими факторами экологической безопасности. Эколого-экономическое обоснование проектных решений, направленных на повышение уровня безопасности техносферных систем, основано на оценке как экологических показателей, характеризующих уровень безопасности, вероятности возникновения происшествий, надежности, величине ущерба, так и экономических показателей управления безопасностью, а именно затрат на проведение природоохранных мероприятий и защиту рабочего персонала. Приводятся результаты анализа степени влияния предпосылок-причин аварийности в рамках модели дерева происшествий. Вводятся критерии оценки эффективности, совместно учитывающие экологические и экономические показатели. Даются рекомендации для принятия эффективных решений в задачах повышения безопасности процессов и систем.

**Ключевые слова:** экологический риск, вероятность происшествия, модель дерева происшествий

**ECONOMIC FACTORS OF THE ECOLOGICAL SAFETY ENGINEERING****Sereda S.N.**

*Murom Institute (branch) of the Vladimir State University n.a. A.G and N.G. Stoletov, Murom, e-mail: sereda-2010@mail.ru*

The aim of work is the system analysis of the efficiency of strategies to provide the required level of the system safety and the reduction of the ecological risk. Environmental and economic feasibility of the proposed solutions, which increase the level of the system safety, are based on the estimation such factors as a probability of accidents, a reliability, a value of damage, the cost of the environmental protection measures and the life safety of workers. The probability analysis of the industrial safety is a method that is widely used for the ecological estimation, in which the model of the analyzed process is used to predict the value of the accident probability. To provide the desirable safety level of the process it is necessary to implement the appropriate measures that strongly impact on the parameters of the model. In order to get effective results the method of the determining of the meaningful reasons of accident is suggested. The efficiency of the alternative strategies is determined by the relation of the risk value to the cost of projects. The criteria of evaluation of the effectiveness, which take into account both an environmental and an economic indicators, is introduced. The optimal decision is described by the goal function as a maximum of the impact factor on the set of alternatives. The results of the analysis of the efficiency of the safety strategies, which can be used in practice, are given.

**Keywords:** environmental risk, probability of accident, model of accident

Обеспечение безопасности систем на всех этапах жизненного цикла является одной из важных задач любой хозяйственной деятельности с целью снижения антропогенного воздействия на окружающую среду и обеспечения нормальных условий среды обитания человека. Эколого-экономическое обоснование предлагаемых проектных решений, направленных на повышение уровня безопасности техносферных систем, основано на оценке как экологических, так и экономических показателей управления безопасностью [3]. С одной стороны экологическая информация рассматривается как экономический фактор, определяющий ресурсосберегающие и экологически чистые технологии хозяйственной деятельности. С другой стороны, существующие физические ограничения выставляют требования применения эффективных стратегий принятия управленческих решений в рамках концепции устойчивого экономического развития. Целью работы является анализ стратегий обе-

спечения требуемого уровня безопасности техносферных систем, определяемых экономическими факторами экологической безопасности.

**Методы анализа безопасности процессов и систем**

Методологической основой системного анализа происшествий в техносфере является вероятностный анализ безопасности (ВАБ), позволяющий дать априорную оценку показателей безопасности исследуемой системы или процесса, в рамках которого строится некоторая модель возникновения происшествия, например, дерево происшествий, отображающая причинно-следственные связи между головным событием (аварией, несчастным случаем, катастрофой) и исходными предпосылками его возникновения [1, 2]. Методика ВАБ нашла широкое применение в системном анализе для решения практических задач оценки и обеспечения безопасности различных технологических процессов и систем [4–8].

В качестве основного показателя безопасности системы или техпроцесса обычно принимают величину экологического риска  $R$ , которая прямо пропорциональна вероятности возникновения происшествий  $Q$  или относительной частоте  $W$ , полученной по данным статистики несчастных случаев и аварий на анализируемом объекте. Кроме того, риск соотносят с размером прогнозируемого социально-экономического и экологического ущерба от происшествия  $MY$ .

Математическое выражение для оценки вероятности возникновения происшествия при использовании моделей дерева происшествий или графа аварийности представляет собой функцию на множестве переменных  $p_i$ , характеризующих вероятности появления предпосылок – причин аварий и несчастных случаев на производстве  $Q = F(p_1, p_2, \dots, p_n)$ . Для оценки влияния каждой отдельной  $i$ -й предпосылки можно составить систему линейных уравнений с одной переменной  $p_i = x_i$ , полагая остальные  $p_k = \text{const}$ ,  $k \neq i$ , вида

$$Q_i(X) = k_i \cdot x_i + b_i. \quad (1)$$

Оценим граничные значения  $Q_i^0(X) = b_i$  при  $x_i = 0$  и  $Q_i^1(X) = k_i + b_i$  при  $x_i = 1$ . Тогда критичность предпосылки определяется по параметру  $b_i$ , а значимость – по  $k_i$ . Более того, значимость и критичность предпосылки не зависят от неё самой, а целиком определяются параметрами  $k_i$  и  $b_i$ . Чем меньше значение  $b_i$ , тем более критична  $i$ -я предпосылка, то есть при её устранении достигается минимум  $Q_i^0(X)$ . Чем больше значение  $k_i$ , тем более значима  $i$ -я предпосылка, то есть при её возникновении достигается максимум  $Q_i^1(X)$ .

В выражении (1) параметр  $k_i$  можно вычислить следующим образом:

$$k_i = Q_i^1(X) - Q_i^0(X) = \lambda_i^B = dQ(X) / dp_i. \quad (2)$$

Параметр  $k_i$  тождественен критерию Бирнбаума  $\lambda_i^B$  и характеризует динамический диапазон изменения и скорость роста функции  $Q(X)$ . Таким образом, повышение безопасности технологического процесса определяется возможностями снижения вероятности возникновения происшествия, а именно снижением вероятностей значимых и критических предпосылок либо уменьшением слагаемых  $k_i$  и  $b_i$ .

На практике несколько предпосылок из всего набора оказываются значимыми и/или критичными, что приводит к многопараметрической задаче оптимизации. Достижение наилучшего решения обеспечивается совместным пропорциональным уменьшением вероятностей значимых и критичных

предпосылок. При этом оптимальное решение принадлежит кривой (траектории оптимизации), характеризующей направление наискорейшего убывания функции  $Q(X)$  (антиградиент) и вычисляемой как  $g(X) = -[\lambda_i^B]$ ,  $i \in [1, n]$ . Траектория оптимизации принадлежит в общем случае криволинейной поверхности в  $n$ -мерной системе координат [9].

### Системный анализ экономических факторов экологической безопасности

С целью снижения риска возникновения происшествий на производстве проводят мероприятия, направленные на повышение уровня безопасности, которые влекут за собой определенные финансовые затраты  $C_i$ , позволяя снизить вероятности появления предпосылок – причин происшествий на некоторую величину  $\Delta p_i$  [10]. Примерами проводимых решений могут быть: резервирование элементов системы (процесса), повышение квалификации персонала, отработка действий в аварийных ситуациях, рациональная организация режима работы с учетом психофизиологических особенностей человека-оператора, улучшение эргономики рабочего места и параметров микроклимата, реинжиниринг технологических процессов, внедрение систем контроля и защиты от неблагоприятного воздействия опасностей и т.д.

Принятие эффективных управленческих решений в сфере безопасности подразумевает некоторую количественную оценку каждого альтернативного мероприятия. В качестве критерия оценки экономической эффективности решений можно взять отношение величины снижения экологического риска  $\Delta R$  к затратам  $C_i$  на проведение мероприятий по внедрению  $i$ -й альтернативы. Экологический риск можно вычислить как произведение изменения вероятности возникновения происшествия  $\Delta Q$  и величины среднего ожидаемого ущерба  $MY$ . Поскольку показатель  $\Delta R$  является вторичным, зависящим от степени снижения вероятности происшествия  $\Delta Q$ , то оценку эффективности можно дать как отношение данного параметра к нормированным затратам  $\tilde{C}_i$  к максимально возможному  $MY/C_{\max}$  на конечном множестве альтернативных решений. Таким образом, оценка экономической эффективности  $E_i$  может быть рассчитана по формуле

$$E_i = \frac{\Delta R}{C_i} = \frac{\Delta Q}{\tilde{C}_i}. \quad (3)$$

Тогда степень снижения вероятности происшествия определяется

$$\Delta Q_i = \lambda_i^B \cdot \Delta p_i \quad (4)$$

где  $\Delta p_i$  – степень снижения вероятности предпосылки после проведения мероприятий;  $\lambda_i^B$  – критерий Бирнбаума, характеризующий значимость  $i$ -й предпосылки.

С учетом (3) и (4) можно ввести показатель эффективности  $v_i$  (импакт-фактор), который учитывает одновременно экологические и экономические показатели, то есть соотношение «затраты – эффект» на множестве альтернатив

$$v_i = \frac{\lambda_i^B}{\max_i \lambda_i^B} \cdot \frac{\Delta p_i}{\tilde{C}_i} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Тогда выбор эффективных решений, направленных на повышение безопасности и снижение потенциального риска возникновения происшествий, определяется целевой функцией  $Z = \max v_i$ . Тогда можно рассматривать эту задачу как дискретную задачу оптимального распределения ресурсов  $C_0$  на проведение мероприятий по повышению безопасности в отношении каждой значимой и/или критичной предпосылки.

Можно привести оценку оптимальных затрат на проведение мероприятий по по-

вышению безопасности в отношении одной отдельно взятой предпосылки, которая обеспечивает необходимую и достаточную степень снижения риска возникновения происшествий при разумных экономических вложениях. Очевидно, что функция затрат  $C(n)$  является линейной и кратной числу единичных вложений (или количеству типовых мер)  $n$ , например, приобретению  $n$  – огнетушителей как элементов системы пожарной безопасности. Вероятность возникновения происшествия (отказа сразу всех огнетушителей в случае возникновения пожара) определяется нелинейной функцией  $P = p^n$ , где  $p$  – вероятность отказа одного огнетушителя. На рис. 1 показаны нормированные кривые, приведенные к максимуму затрат и начальному значению вероятности  $p$ . При этом кривая  $p_2$  характеризует уменьшение вероятности в два раза на каждое единичное вложение. Тогда экономически оптимальное число огнетушителей  $n_{\text{опт}}$ , позволяющее достичь требуемого уровня безопасности, определяется точкой пересечения графиков затрат и вероятности происшествия. Определить значение  $n_{\text{опт}}$  можно по функции разности  $d_k = c_k - p_k$  (рис. 2, а), где кривые пересекают ось абсцисс, или по минимуму функции среднего  $s_k = (c_k + p_k)/2$  (рис. 2, б), используя соответствующие численные методы.

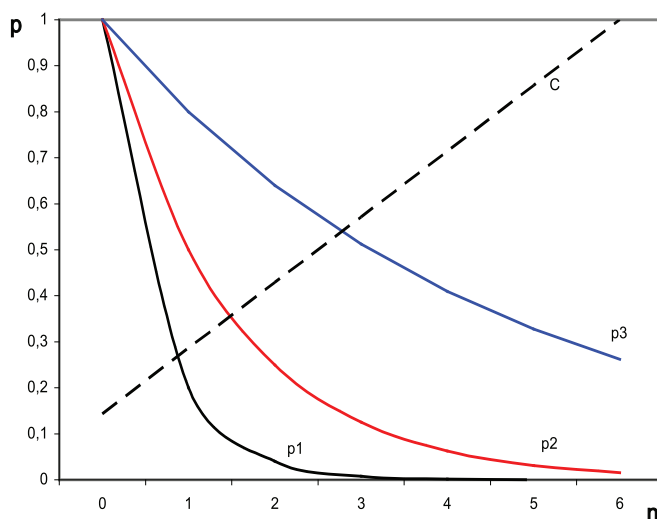


Рис. 1. Соотношение затрат  $C(n)$  и вероятности происшествия  $P$ ,  $p_1 < p_2 < p_3$

### Заключение

Представленные в работе результаты отражают важную сторону системного анализа безопасности процессов и систем, характеризующую стратегию принятия эффективных решений, имеющих экологи-

экономическое обоснование. Дана оценка степени снижения экологического риска в зависимости от затрат на проведение мероприятий, и приводятся некоторые рекомендации по анализу эффективности стратегий повышения безопасности процессов и систем.

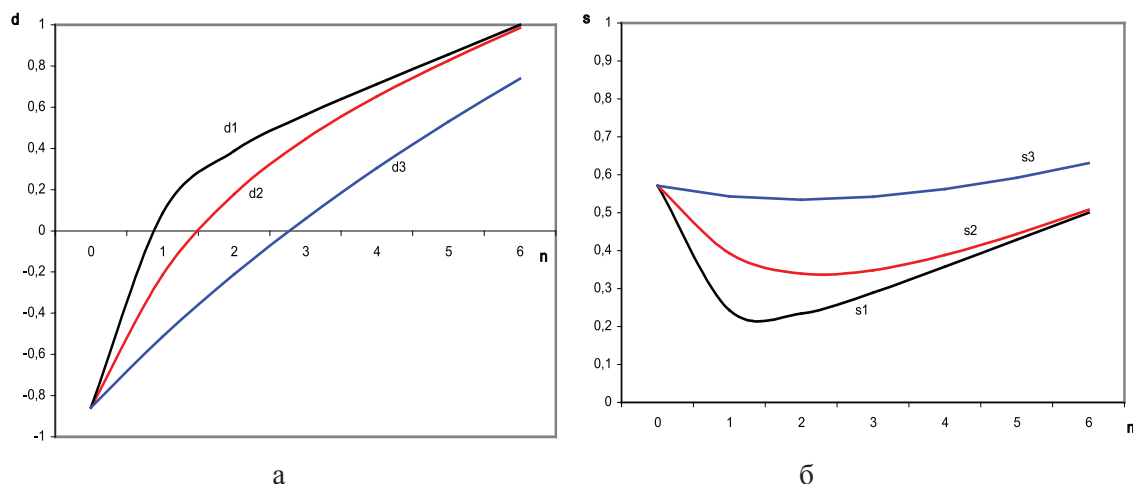


Рис. 2. Графики оценки эффективности снижения риска происшествий:  
а – функция разности  $d$ ; б – функция среднего  $s$

### Список литературы

1. Антонов А.В. Системный анализ. Математические модели и методы. – Обнинск: ИАТЭ, 2002. – 114 с.
2. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. – М.: Академия, 2003. – 512 с.
3. Красс М.С. Моделирование эколого-экономических систем. – М.: ИнфраМ, 2010. – 272 с.
4. Мусихина Е.А. Пространственно-временная модель оценки эколого-экономического риска // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 4. – С. 46–52.
5. Острейковский В.А. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. – М.: Физматлит, 2008. – 349 с.
6. Острейковский В.А., Шевченко Е.Н. Модель техногенного риска с учетом зависимости между вероятностью исходных событий и ущербом // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: [www.science-education.ru/104-6774](http://www.science-education.ru/104-6774) (дата обращения: 16.09.2013).
7. Переездчиков И.В. Анализ опасностей промышленных систем человек-машина-среда и основы защиты. – М.: КНОРУС, 2011. – 784 с.
8. РД 03-418-01. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности, охраны недр. Госгортехнадзор России, 2001. – 20 с.
9. Серeda С.Н. Оптимизация показателей безопасности технологических процессов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2(9). – С. 26–30.
10. Серeda С.Н. Анализ эффективности методов снижения экологического риска // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 4(18). – С. 20–25.

### References

1. Antonov A. System Analysis. Mathematical models and methods. Obninsk, IATE, 2002. 114 p.

2. Belov P. System analysis and modeling of the dangerous processes in techosphere. Moscow, Academia, 2003. 512 p.
3. Krass M.S. Modeling of ecologo-economics systems. Moscow, Infra-M, 2010. 272 p.
4. Musichina E. Time-space model of the estimation of the ecology-economical risk. *Information systems and technologies*. 2012. no.4, pp. 46–52.
5. Ostreikovsky V. The probability analysis of the AES safety. Moscow, Phismatlit, 2008. 349 p.
6. Ostreikovsky V., Shevchenko E. The risk model considering the dependence between the probability of initial events and damage. *Modern problems of science and education*. 2012. no. 4; Available at: <http://www.science-education.ru/104-6774> (accessed 16 September 2013).
7. Perezdchikov I. The Analysis of the dangerous of industrial systems «Men-machine-environment and the defense base». Moscow, CNORUS, 2011. 784p.
8. RD 03-418-01. Methodical recommendations to the risk analysis of the dangerous industrial objects. Documents of interfiled application on the application of the safety engineering. Gostehnadzor of Russia, 2001. 20 p.
9. Sereda S. Optimization of the technological processes safety indicators. *Engineering industry and life safety*. 2011. no.2(9), pp. 26–30.
10. Sereda S. Estimation of the ecological risk with fuzzy models *Engineering industry and life safety*. 2013. no.3(17), pp. 15–20.

### Рецензенты:

Жизняков А.Л., д.т.н., профессор, зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования, МИ (филиал) ВлГУ, г. Муром;  
Орлов А.А., д.т.н., доцент, зав. кафедрой физики и прикладной математики, МИ (филиал) ВлГУ, г. Муром.

Работа поступила в редакцию 15.01.2014.