

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*На основе системно-динамических методов моделирования откликов производственной системы на управляющие воздействия (организационно-методические, технические и другие решения) осуществляется прогнозирование целевой функции безопасности, зависящей от различных видов рисков (травм, смертельных случаев, профессиональных заболеваний и др.).*

*Ключевые слова: безопасность, риск, математическое моделирование.*

*L.E. Sheinkman, A.G. Danilenko*

## **SAFETY MANAGEMENT AT MINING AND PROCESSING INDUSTRY**

*Based on a system-dynamic modeling of the production system responses to control actions (organizational-methodological, technical and other solutions) is predicting the target security features, depending on the different types of risks (injuries, fatalities, occupational diseases, etc.).*

*Key words: security, risk, mathematical modeling.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 2 ноября 2013 г.

### **Введение**

До настоящего времени проблема безопасности труда в промышленности рассматривалась с точки зрения соответствия фактических данных нормативным. При этом в лучшем случае использовалась статистическая обработка ретроспективных данных об отказах оборудования, авариях и травмах на производстве. В такой методологической постановке система обеспечения безопасности труда являлась слабоуправляемой.

В данной статье на основе системно-динамических методов моделирования откликов производственной системы на управляющие воздействия осуществляется **прогнозирование целевой функции безопасности труда**, зависящей от различных видов рисков (травм, смертельных случаев профессиональных заболеваний и др.). В качестве целевой функции безопасности труда выбрана **средняя ожидаемая продолжительность предстоящей трудовой деятельности (СОППТД)** работников. В качестве управляющих воздействий используются организационно-методические, технические и другие решения, направленные на снижение различных видов риска.

Система обеспечения безопасности труда включает:

1. Базу данных, содержащую сведения об авариях, несчастных случаях, инцидентах технических систем, состоянии и износе оборудования, нарушениях требований нормативно-правовых документов, аттестации рабочих мест, обеспеченности средствами индивидуальной защиты персонала, укомплектованности штатов надзорных органов, уровне знаний по охране труда и др.

2. Комплекс методов моделирования откликов производственной системы на управляющие воздействия.

3. Методику и организацию обнаружения нарушений и отклонений от нормативных и установленных значений показателей, влияющих на безопасность труда (индикаторов опасности), включающих: классификацию несчастных травм, профзаболеваний; анализ причин их возникновения; анализ последствий аварийной ситуации и оценку безопасности труда по фактическим значениям индикаторов опасности.

4. Комплекс организационно-технических, методических и информационных решений для реализации эффективной стратегии управления системой обеспечения безопасности труда.

Как и во многих динамических задачах полезным и упрощающим дальнейший анализ является поиск квазистационарных параметров, определяющих математическую модель процесса. Так в данном случае анализ массива несчастных случаев за последние годы в динамике с учётом классификации несчастных случаев со смертельным исходом на опасных производственных объектах РФ по техническим и организационным причинам [1] позволил выявить некоторые закономерности (табл. 1).

Таблица 1

**Причины и распределение несчастных случаев**

<b>Основные причины</b>	<b>Количество несчастных случаев, %</b>
Травмирование в результате аварии	6,4
Нарушение технологии производства работ, неисправность или умышленное исключение технических устройств, в т.ч. приборов безопасности	28,2
Низкий уровень защиты исполнителей работ	10,2
Недисциплинированность, неосторожность, неправомерные действия исполнителей работ	22,9
Низкий уровень управления производством	28,3
Другие причины, не связанные с промышленной безопасностью (умышленные действия пострадавших, заболевания, алкогольное опьянение и др.)	3,9

Эти закономерности сводятся в частности к тому, что частая повторяемость однородных несчастных случаев связана не только с несовершенством технических устройств и приёмами работ, которые, как правило, бывают малоизвестными и не отражаются в актах о несчастных случаях, и, следовательно, могут быть мало полезными уроками на будущее. Анализ причин несчастных случаев путём предлагаемой классификации позволил выявить набор индикаторов опасности, указывающих на возможность возникновения внештатной ситуации и как, следствие, приводящих к несчастному случаю.

На основе метода факторного анализа получен следующий набор факторов (индикаторов опасности):

- уровень знаний по охране труда;
- обеспеченность средствами индивидуальной защиты персонала;
- доля неисправного оборудования в подразделении;
- доля аттестованных рабочих мест в подразделении;
- доля работающего не по специальности персонала;
- укомплектованность штатов надзорных органов;
- степень износа оборудования.

Цель и идея работы определили необходимость решения следующих задач:

- установить зависимость различных видов риска от значений индикаторов опасности;
- установить зависимость целевой функции безопасности от различных риска;
- оценить потребность в инвестициях, необходимых для снижения рассматриваемых рисков до заданного уровня в течение заданного периода времени.

### **Математическая формулировка задачи установления зависимости рисков от значений индикаторов опасности**

Для формализации перечисленных выше задач введём следующие обозначения:

$t$  – индекс времени ( $t = 1, 2, \dots, T$ , где  $T$  – интервал наблюдения);

$\lambda_j(t)$  – интенсивность несчастных случаев  $j$ -го вида на полуинтервале  $(t-1, t]$  на одного работающего;

$\mu_i(t)$  – значение индикатора опасности  $i$ -го вида на полуинтервале  $(t-1, t]$ ,  $i = \overline{1, I}$ ;  $t = \overline{1, T}$ ; ( $0 \leq \mu_i(t) \leq 1$ ).

Исследование реального распределения несчастных случаев и механизмов, приводящих к установлению такого распределения, позволило статистически обосновать гипотезу об экспоненциальной зависимости интенсивностей несчастных случаев от значений индикаторов опасности при условии квазистационарности параметров математической модели процесса:

$$\lambda_j(\mu_i, i = \overline{1, I}) \sim \omega_{ij} e^{-\delta_i \mu_i},$$

где  $0 \leq \mu_i \leq 1$ ;

$\omega_{ij}$  – вес  $i$ -го индикатора опасности в  $j$ -м виде несчастного случая (риска);

$\delta_i$  – коэффициент, определяющий скорость уменьшения риска по  $i$ -му индикатору опасности;

$$\sum_{i=1}^I \omega_{ij} = 1, \forall j.$$

Метод факторного анализа позволил получить значения  $\omega_{ij}$  с учётом их относительного постоянства на протяжении достаточно длительного периода времени наблюдения.

Из предположения о вложении финансовых ресурсов во все мероприятия, связанные со снижением риска, можно считать:

$$\lambda_{ji}(t) \sim L(\omega_{ij}(t)e^{-\delta_i \mu_i(t)}),$$

и в силу малости  $\lambda_{ji} \ll 1$ ,  $\delta_i \ll 1$  – можно доказать, что в первом приближении

$$\lambda_{ji}(t) \sim \sum_{i=1}^I \omega_{ij}(t) e^{-\delta_i \mu_i(t)}.$$

Таким образом, по результатам наблюдений  $\hat{\lambda}(t)$ ,  $\hat{\mu}_i(t)$  и  $\hat{\omega}_{ij}$  можно вычислить значения  $\delta_i$ , определяющие степень влияния  $i$ -го индикатора на снижение риска  $j$ -го вида.

Оценку параметров математической модели можно осуществить с использованием нелинейного метода наименьших квадратов.

Для этого решается следующая задача: найти  $\delta_i$  при известных параметрах  $\hat{\lambda}(t)$ ,  $\hat{\mu}_i(t)$ ,  $\hat{\omega}_{ij}$ , обеспечивающих минимум функции:

$$\sum_{t=1}^T \left[ \hat{\lambda}_j(t) - \sum_{i=1}^I \hat{\omega}_{ij} e^{-\delta_i \hat{\mu}_i(t)} \right]^2 \rightarrow \min.$$

Таким образом, могут быть получены регрессионные зависимости  $\lambda_j(t)$ , которые используются при решении основной задачи оптимизации целевой функции безопасности.

### **Математическая формулировка задачи установления зависимости целевой функции безопасности от различных видов риска**

В качестве целевой функции безопасности выбрана СОПТД работающих. В качестве управляющих воздействий используются ресурсы, в частности, финансовые средства, направляемые на снижение различных видов риска работающих.

Возникает проблема оценки влияния вкладываемых ресурсов в снижение рисков на продолжительность предстоящей трудовой деятельности работающих.

В общем виде функцию безопасности  $\Phi$  можно выразить следующим образом:

$$\Phi = \Phi\{R_1(x_1), R_2(x_2), \dots, R_n(x_n)\},$$

где  $R_i$  – риск  $i$ -го вида;

$x_i$  – ресурсы, вкладываемые в снижение риска  $i$ -го вида.

Аналитический вид функции  $\Phi$  следует из точной формулы определения математического ожидания случайной величины, в качестве которой в нашем случае рассматривается СОПТД работающих (3):

$$\Phi[R(t)] = \int_0^T t R(t) e^{-\int_0^t R(\tau) d\tau} dt,$$

где  $R(t)$  – полный риск, а интегрирование проводится по всему периоду времени жизни работающих на объекте.

Необходимым условием максимума функции  $\Phi$  является [2]:

$$\frac{\partial R_0}{\partial x_0} = \frac{\partial R_{ПП}}{\partial x_{ПП}} = -\frac{1}{C},$$

где  $R(t) = R_0(t) + R_{ПП}(t)$ ;

$R_0$  – риск при отсутствии производственной деятельности;

$R_{ПП}$  – риск производственной деятельности, в нашем случае  $R_{ПП} = \lambda$ ;

$x_0$  – ресурсы, вкладываемые в снижение риска  $R_0$ ;

$C$  – прирост выработки на одного работника за год, необходимый для увеличения средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни работника на один год.

Необходимое условие максимума функции  $\Phi$  связывает стоимость единицы риска с уровнем технико-экономического состояния производственного объекта и позволяет оценить, насколько затраты на снижение различных рисков далеки от оптимальных.

Достаточным условием максимума функции безопасности является выпуклость "эластичностей" всех рисков по вложениям в их снижение:

$$\frac{\partial^2 R_{ПП}}{\partial x_{ПП}^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 R_0}{\partial x_0^2} > 0.$$

Усреднение по группам производственных объектов с близкими показателями по годовой выработке на одного работника и регрессия на этот показатель дали степенную зависимость прироста выработки на одного работника за год, необходимый для увеличения средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни работника на один год, с показателем степени, большим единицы:

$$C \sim \alpha x^\beta, \quad \beta > 1.$$

При этой зависимости выполняются достаточные условия существования максимума функции безопасности [2, 3].

Анализ статистических данных показывает, что  $R_0$  и  $\lambda$  меняются незначительно на протяжении довольно длительного периода трудовой деятельности работника [4], следовательно, можно воспользоваться первым членом разложения  $\Phi$ :

$$\Phi(R_0 + \lambda) \sim \frac{1}{R_0 + \lambda},$$

где  $R_0 \ll 1, \lambda \ll 1$ .

Следовательно,  $\Phi$  достигает максимума при минимуме  $(R_0 + \lambda)$ .

### **Математическая формулировка задачи оценки потребности в инвестициях на снижение рисков**

Путём введения стоимостного эквивалента индикаторов опасности организационного и технического характера, влияющих на снижение риска, задача управления безопасностью формулируется следующим образом: найти управляющие воздействия, то есть распределить финансовые ресурсы (выбрать оптимальную структуру инвестиционного портфеля), обеспечивающие максимум функции безопасности

$$\Phi[\lambda] = \Phi \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \varpi_{ij} e^{-\delta_i \mu_i(x_i)} \right\} \rightarrow \max,$$

или, в первом приближении, минимум эквивалентного выражения:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \varpi_{ij} e^{-\delta_i \mu_i(x_i)} \rightarrow \min,$$

при условии ограниченности выделяемых на безопасность средств:

$$\sum_{i=1}^I x_i \leq X, \quad x_i \geq 0,$$

при известных  $\varpi_{ij}$ ,  $\delta_i$  и зависимостях  $\mu_i(x_i)$ , где  $x_i$  – финансовые ресурсы, вкладываемые в  $i$ -й индикатор опасности.

С использованием полученной модели может быть сформулирована задача снижения за планируемое время  $T_{ПЛ}$  до заданного уровня различных видов риска и расчёта требуемых для этого финансовых ресурсов, например, следующим образом:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_i(t) \rightarrow \min,$$

при выполнении условий:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \varpi_{ij} e^{-\delta_i \mu_i[x_i(t)]} &\leq \lambda_{ПЛ}(t), \\ \forall t = 1, 2, \dots, T_{ПЛ}, \\ x_i &\geq 0, \end{aligned}$$

где  $\lambda_{ПЛ}(t)$  – планируемый уровень риска на производстве в год  $t$ .

Так как в нашем случае имеются ограничения неотрицательности на искомые переменные:  $x_i \geq 0$ , то задача оптимизации превращается в задачу нелинейного программирования, для решения которой разработан специальный вычислительный алгоритм на основе модификации метода овражного шага И.М. Гельфанда, являющегося развитием классической "градиентной" традиции [5].

#### Литература

1. *Аварии* и несчастные случаи в нефтяной и газовой промышленности России: монография / Аванесов В.А., Мартынюк В.Ф., Соколов Э.М. и др. М.: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. 214 с.
2. *Соколов Э.М., Качурин Н.М., Шейнкман Л.Э.* Основы теории надёжности и риска технологических систем: учеб. пособие. Тула: Тул. гос. ун-т, 2000. 180 с. (Рекомендовано УМО вузов по образованию в области машиностроения и приборостроения в качестве учебного пособия для студентов технических университетов и вузов).
3. *Соколов Э.М., Шейнкман Л.Э.* Безопасность транспортирования взрывчатых материалов по железной дороге // Безопасность жизнедеятельности. 2001. №1. С. 11-18.
4. *Статистический* сборник. Россия 2002, Госкомстат, 2003.
5. *Моисеев Н.Н.* Математика ставит эксперимент. М., 1979. 224 с.