

DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-6-140-146
УДК 622.276

Н.Д. Колесов, Д.А. Мельникова, Г.Н. Яговкин (Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация)

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Nikolay D. Kolesov, Dariya A. Melnikova, German N. Yagovkin
(Samara State Technical University, Samara, Russian Federation)

FORECASTING MODEL FOR DEVELOPMENT PROCESS OF EMERGENCY SITUATIONS IN HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

Введение

На опасных производственных объектах нефтегазовой отрасли аварии происходят достаточно редко, но с большим ущербом материальным, людским и экологическим ценностям. Поэтому прогнозирование их возникновения и особенно динамики развития является одним из основных показателей состояния промышленной безопасности. Имеется достаточное количество работ в этой области, но точность прогноза зависит от вида выбранных показателей и способа оценки их взаимодействия.

Цели и задачи :

- выбрать показатели, позволяющие наиболее точно прогнозировать возникновение и динамику развития аварийной ситуации;
- создать модель, позволяющую анализировать процесс развития аварийной ситуации.

Методы

В качестве базовой была использована модель Лотки-Вольтерры, позволяющая выполнить глубокий анализ развития аварийной ситуации.

Результаты

Разработана модель развития аварийной ситуации на опасном производст-

Background

Accidents occur at hazardous industrial facilities in the oil and gas industry quite rarely, but including great damage to material, human and environmental values. Therefore, the prediction of their occurrence and especially the development dynamics is one of the main industrial safety indicators. There is a sufficient amount of works in this sphere, but the forecast accuracy depends on the type of selected indicators and the method of evaluating their interaction.

Aims and Objectives:

- select the indicators that allow predicting emergency situation occurrence and development dynamics more correct;
- create the model to analyze emergency situation development.

Methods

As a basic model, the Lotka-Volterra equations were used. It allows to fulfill deep analysis of the emergency development.

Results

A model for the emergency development at a hazardous production facility has been ob-

венном объекте, в которой в качестве интегративных критериев выбраны отношение скорости изменения энтропии, возникшей при освобождении или получаемых энергетических потенциалов, к ее остаточной величине и ущерб от материальных, людских и экологических потерь.

tained in which the ratio of the change rate for entropy arising from release or received energy potentials to its residual value and damage from material, human and environmental losses are chosen as integrative criteria.

Ключевые слова: опасность, энтропия, авария, ущерб, фазовая траектория, динамика, устойчивость системы, колебания

Key words: danger, entropy, accident, damage, solution curve, dynamics, system stability, fluctuations

В настоящее время на опасных производственных объектах нефтегазовой отрасли происходит масштабная модернизация существующих производств. Для этого требуется и принципиально иное качество управления организациями, и изменение практически всех используемых технологий, почти всего парка машин и оборудования. Причем лучшие технологии – это в большинстве случаев и самые энергоэффективные, энергосберегающие технологии, самые экономичные и экологически чистые [1]. Одновременно с этим происходят серьезные позитивные изменения в области промышленной безопасности.

Растет финансирование предупредительных мер по обеспечению промышленной безопасности, снижаются общее количество пострадавших на производстве и численность больных с профессиональными заболеваниями. В то же время темпы снижения количества пострадавших и больных с профессиональными заболеваниями за последние годы (и соответственно потерь рабочего времени) снижаются. Современным средством повышения эффективности промышленной безопасности является управление ею с использованием так называемого «метода целевых нормативов и показателей».

Система показателей как инструмент управления должна позволять [2]:

- четко сформулировать цели и выразить их количественно;

- транслировать цели по вертикали управления на все уровни («дерево показателей и нормативов» становится инструментом согласования стратегического и операционного планов);
- вести мониторинг и измерение результатов (оценка степени достижения цели);
- вовремя диагностировать проблемы, требующие управленческого вмешательства (показатели как индикаторы проблем);
- своевременно осуществлять корректировку целей в случае их недостижимости, улучшая тем самым качество планирования;
- делегировать полномочия;
- сравнивать между собой объекты, предприятия, подразделения;
- оценивать уровень менеджмента и эффективность подразделений.

Одним из основных таких показателей является прогнозирование аварийной ситуации за счет опасности ее появления.

Опасность – это явления и процессы, способные в определенных условиях при воздействии различных факторов окружающей среды привести к аварии и нанести ущерб материальным ценностям и здоровью человека непосредственно или косвенно [3]. Она возникает при освобождении накопленных или получаемых энергетических потенциалов при реализа-

ции всякого производственного процесса [4]. Энтропия любой системы обратно пропорциональна величине, накопленной в ней энергии, т.е. той, которая способна к дальнейшим превращениям. Она является мерой вероятности пребывания системы в данном состоянии, что отражает ее тенденцию, состоящей из очень большого числа хаотически движущихся частиц, к самопроизвольному переходу из состояний менее вероятных в более вероятные. Любая физическая система при переходе из одного состояния в другое имеет очень большую энтропию, т.е. неустойчива, и поэтому опасна. Оценить можно следующим образом.

Опасность, связанную с неопределенностью H_j , характеризует скорость ее изменения V_0 :

$$V_j = \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

где t - промежуток времени изменения энтропии.

Более точной характеристикой является отношение скорости изменения энтропии к ее остаточной величине H_0 :

$$y_j = \frac{H_j}{H_0}. \quad (2)$$

Усреднив $y_j(t)$ за промежуток времени T , получаем интегральный критерий y :

$$y = \int_0^T y_j(t) dt, \quad (3)$$

который учитывает основные показатели энтропии - скорость изменения и величину после изменения за установленный промежуток времени.

Опасность возникновения аварийной ситуации носит вероятностный характер [5].

Количественно оценить динамику ее появления после сбора информации (рисунок 1) удобно с использованием модели Лотки-Вольтерры [6].

Если принять γ как уровень опасности, а через n обозначить материальный и человеческий ущерб, то $Z(n, \gamma)$ будет характеризовать состояние динамической системы обеспечения промышленной безопасности.

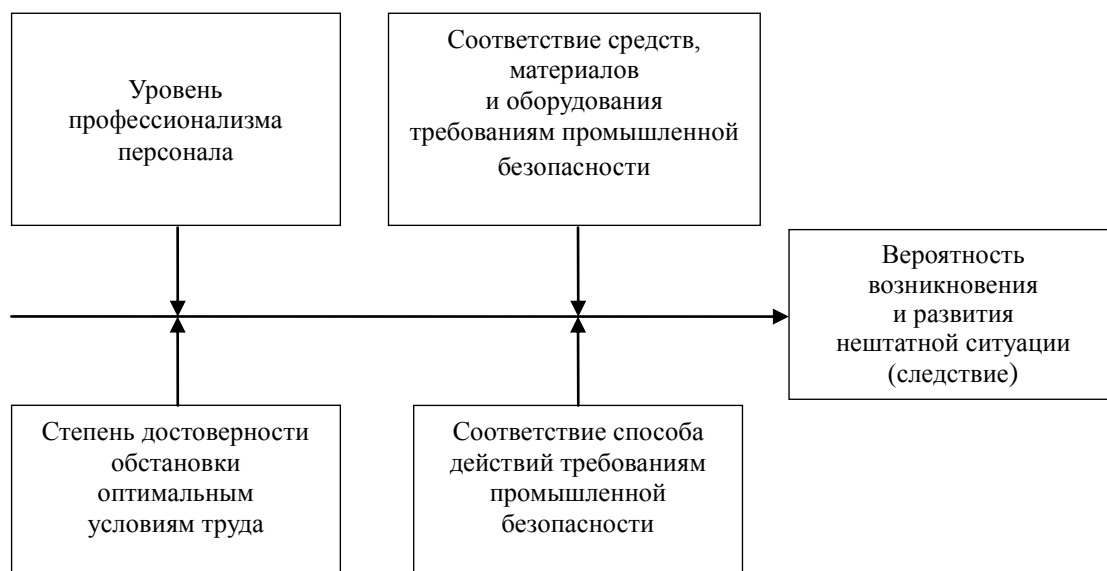


Рисунок 1. Причинно-следственная диаграмма для сбора информации о вероятности возникновения нештатной ситуации

Пусть скорость изменения ущерба будет $\dot{n} = \frac{dn}{dt}$. Если опасность имеет место, то зависимость изменения \dot{n} линейна

$$\dot{n} = \varepsilon_1 n, \quad (4)$$

где ε_1 - коэффициент, зависящий только от параметров, характеризующих опасность появления аварии.

Аналогично, скорость изменения уровня опасности $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$:

$$\dot{\gamma} = -\varepsilon_2 \gamma,$$

где ε_2 - коэффициент, характеризующий возможности предприятия в области обеспечения промышленной безопасности.

Скорость изменения \dot{n} и $\dot{\gamma}$ также пропорциональна n и γ , но только с коэффициентом, зависящим от параметра другого вида. Так, для n этот коэффициент уменьшается с увеличением γ , а для γ увеличивается с увеличением n . Эта зависимость также линейна.

Система уравнений, характеризующая развитие аварийной ситуации, будет:

$$\begin{aligned} \dot{n} &= \varepsilon_1 n - a_1 \gamma n \\ \dot{\gamma} &= -\varepsilon_2 \gamma - a_2 n \gamma, \end{aligned} \quad (5)$$

где a_1, a_2 - коэффициенты пропорциональности.

Построим фазовый портрет динамической системы (5). За фазовое пространство возьмем $n > 0$ и $\gamma > 0$. Умножая первое уравнение на a_2 , второе на a_1 и складывая их, получаем:

$$a_2 \dot{n} + a_1 \dot{\gamma} = \varepsilon_1 a_2 n - \varepsilon_2 a_1 \gamma, \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 \frac{\dot{n}}{n} + \varepsilon_1 \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} = \varepsilon_1 a_2 n - \varepsilon_2 a_1 \gamma, \quad (7)$$

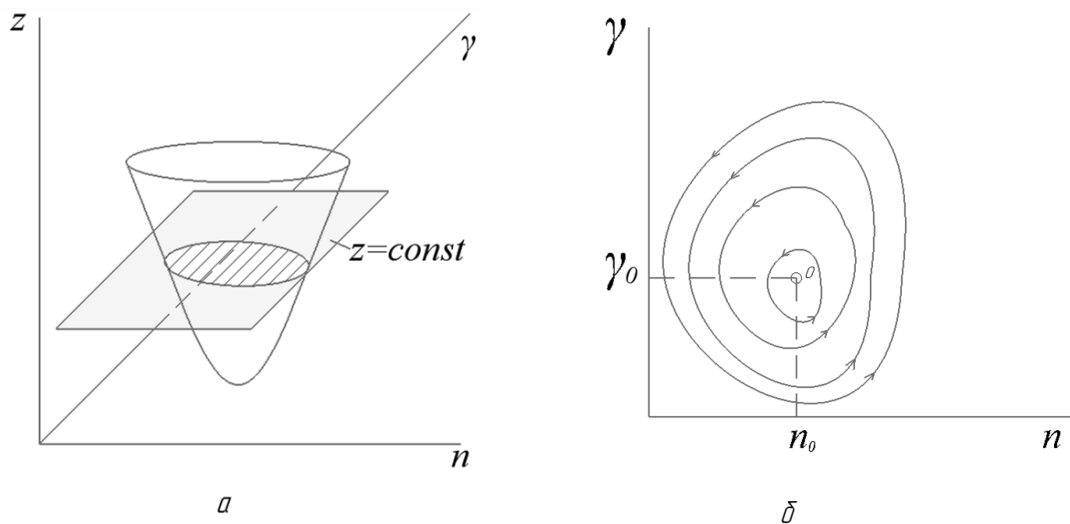
вычитая (7) из (6) и интегрируя, получим:

$$\alpha_2 n + \alpha_1 \gamma - \varepsilon_2 \ln n - \varepsilon_1 \ln \gamma = \text{const}. \quad (8)$$

Выражение (8) в неявном виде дает уравнение фазовых траекторий (рисунок 2).

Рассмотрим поверхность $Z(n, \gamma)$:

$$Z = \alpha_2 n + \alpha_1 \gamma - \varepsilon_2 \ln n - \varepsilon_1 \ln \gamma. \quad (9)$$



а) поверхность фазовых траекторий;
б) фазовые траектории

Рисунок 2. Фазовый портрет системы развития аварийной ситуации

Фазовые траектории являются линиями уровня этой поверхности. Функция $Z(n, \gamma)$ имеет минимальное значение при $n \rightarrow n_0$ и $\gamma \rightarrow \gamma_0$, являющихся координатами состояния равновесия системы. Фазовый портрет динамической системы содержит одно состояние равновесия - точку 0. Все остальные фазовые траектории замкнуты и охватывают состояние равновесия.

Определим устойчивость стационарного состояния системы. Приравняв правые части уравнения (5) к нулю, получим нетривиальное стационарное решение:

$$\begin{aligned} \varepsilon n - \alpha_1 \gamma_n &= 0 \\ -\varepsilon_2 \gamma - \alpha_2 n_\gamma &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Чтобы исследовать устойчивость стационарного состояния, представим n и γ в виде:

$$\bar{n} = n_0 + n ; \bar{\gamma} = \gamma_0 + \gamma . \quad (11)$$

Подставляя эти выражения в уравнение (5) и допуская, что приращения n и γ малые величины и их произведением можно пренебречь, получим систему уравнений:

$$\dot{n} = -\varepsilon_2 \gamma ; \dot{\gamma} = \varepsilon_1 n, \quad (12)$$

которые описывают поведение малых отклонений n и γ от стационарного состояния.

Исключая γ , получим уравнение гармонического осциллятора с круговой частотой:

$$\omega = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2} . \quad (13)$$

Как видно из выражения (9), полученная модель (рисунок 2) является нелинейной. Существенной особенностью динамики нелинейных систем является то, что период колебаний процесса не постоянен, а изменяется по мере изменения внешнего воздействия. Причем нелинейная система, устойчивая при одних значениях, неустойчива при других значениях этого воздействия [7].

Система обладает областью устойчивости при $n \rightarrow n_0$ и $\gamma \rightarrow \gamma_0$. При отклонении этих параметров от номинальных значений

устойчивость системы нарушается, и возникает колебательный процесс с круговой частотой (13).

Для обеспечения устойчивости процесса регулирования необходимо найти оптимальный его параметр:

$$\beta = \frac{\dot{\gamma}/\gamma}{n} . \quad (14)$$

Параметр, характеризующий адаптивность β , способность управлять с помощью γ динамикой системы развития аварийной ситуации.

Большим значениям параметра β соответствуют большие значения γ и $\dot{\gamma}$ и малые n . Если β мал, то уровень опасности начинает экспоненциально возрастать (рисунок 3, а). При увеличении β в системе наступает неустойчивое равновесие. При любом отклонении от него уровень опасности возникновения аварийной ситуации начинает колебаться с возрастающей амплитудой (рисунок 3, б). Система плохо адаптирована, и не может регулировать отклоняющие воздействия. С некоторого значения β в системе возникают устойчивые периодические колебания.

При дальнейшем увеличении β амплитуда этих колебаний уменьшается, но не до нуля.

Существует такое значение $\beta_{кр}$, которому соответствует ненулевое значение амплитуды колебаний. При $\beta > \beta_{кр}$ равновесие системы становится устойчивым, и любое достаточно малое отклонение от него «исправляется» системой (рисунок 3, в). Однако область устойчивости равновесия системы мала.

При дальнейшем росте β размеры области устойчивости возрастают. При больших значениях β равновесие будет глобально устойчивым, и уже любые возмущения будут гаситься.

Между γ и n существует обратная корреляционная связь: чем лучше состояние промышленной безопасности, тем меньше ущерб.

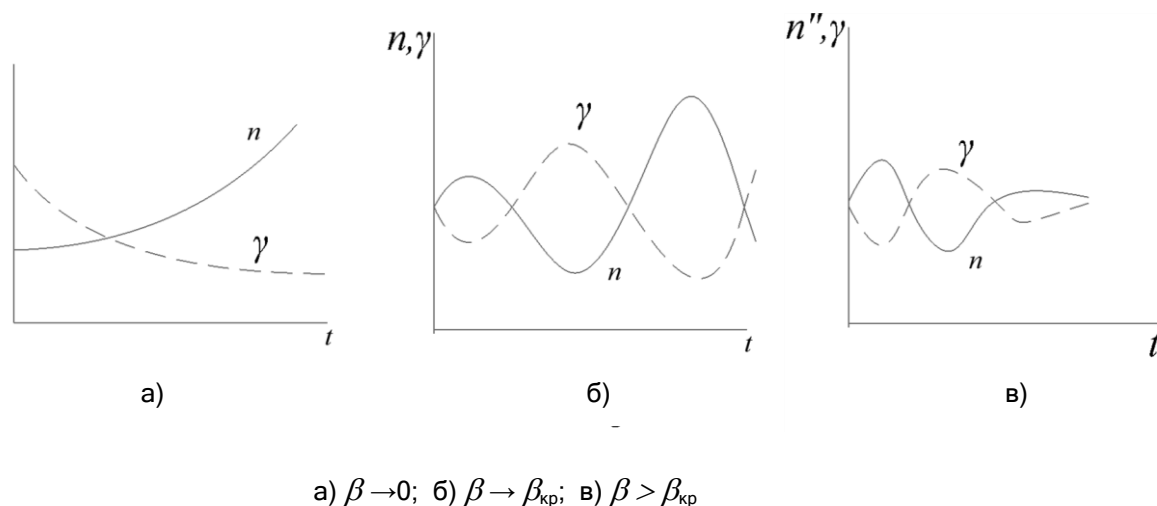


Рисунок 3. Динамика ущерба в зависимости от показателей опасности

Вывод

Получена модель развития аварийной ситуации на опасном производственном объекте, в которой в качестве интегративных критериев выбраны отношение скорости из-

менения энтропии, возникшей при освобождении или получаемых энергетических потенциалов, к ее остаточной величине и ущерб от материальных, людских и экологических потерь.

Список литературы

1. Алекина Е.В., Мельникова Д.А., Яговкин Г.Н. Теоретические основы формирования интегративной системы управления безопасностью производства / Под общ. ред. Г.Н. Яговкина. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. 281 с.
2. Бубнов М.В. Управление безопасностью - задачи обеспечения экономической эффективности // Охрана труда. 2008. Вып. 3. С. 80-90.
3. Браун Д.Б. Анализ и разработка систем обеспечения техники безопасности: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 359 с.
4. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. М.: ГНТБ «Безопасность». МИБ, СТС. 1996. 424 с.
5. Вероятностный анализ безопасности АС. М.: ЯЭ, 1992. 226 с.
6. Неймарк Ю.И., Коган Н.Я., Савельев В.П. Динамические модели теории управления. М.: Наука, 1985. 399 с.
7. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1969. 355 с.

References

1. Alekina E.V., Mel'nikova D.A., Yagovkin G.N. *Teoreticheskie osnovy formirovaniya integrativnoi sistemy upravleniya bezopasnost'yu proizvodstva* [Theoretical Foundations of the Formation of an Integrative System of Production Safety Management]. Samara, Samar. gos. tekhn. un-t, 2018. 281 p. [in Russian].
2. Bubnov M.V. *Upravlenie bezopasnost'yu - zadachi obespecheniya ekonomicheskoi effektivnosti* [Security Management - the Task of Ensuring Economic Efficiency]. *Okhrana truda - Labour Protection*, 2008, Issue 3, pp. 80-90. [in Russian].
3. Braun D.B. *Analiz i razrabotka sistem obespecheniya tekhniki bezopasnosti: Per. s angl.* [Analysis and Development of Safety Systems: Trans. from Engl.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 359 p. [in Russian].
4. Belov P.G. *Teoreticheskie osnovy sistemnoi inzhenerii bezopasnosti* [Theoretical Foundations of System Engineering Security]. Moscow, GNTB «Bezopasnost'», MIB, STS, 1996. 424 p. [in Russian].

5. *Veroyatnostnyi analiz bezopasnosti AS* [Probabilistic Safety Analysis of the AU]. Moscow, YaE, 1992. 226 p. [in Russian].

6. Neimark Yu.I., Kogan N.Ya., Savel'ev V.P. *Dinamicheskie modeli teorii upravleniya* [Dynamic Models of Control Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 399 p. [in Russian].

7. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The Theory of Automatic Control]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 355 p. [in Russian].

Авторы

• Колесов Николай Дмитриевич
Самарский государственный технический университет
Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Российская Федерация, 443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская, 244
тел. (846) 332-56-47

• Мельникова Дарья Александровна, канд. техн. наук
Самарский государственный технический университет
Доцент кафедры «Автоматизации и управления технологическими процессами»
Российская Федерация, 443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская, 244
e-mail: melnikovada1988@mail.ru

• Яговкин Герман Николаевич, д-р техн. наук, профессор
Самарский государственный технический университет
Профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Российская Федерация, 443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская, 244
тел. (846) 332-56-47

The Authors

• Kolesov Nikolay D.
Samara State Technical University
Post-graduate Student of Life Safety Department
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100,
Russian Federation
tel: (846) 332-56-47

• Melnikova Dariya A., Candidate of Engineering Sciences
Samara State Technical University
Assistant Professor of Automation and Control of Technological Processes Department
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100,
Russian Federation
e-mail: melnikovada1988@mail.ru

• Yagovkin German N., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Samara State Technical University
Professor of Life Safety Department
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100,
Russian Federation
tel: (846) 332-56-47