Ю.В. Прус, А.Р. Колесникова, Е.А. Клепко, В.М. Шаповалов
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: prus.yurii@gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ТЕХНОГЕННЫХ И ПОЖАРНЫХ РИСКОВ В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Предлагается Марковская динамическая модель социотехнической системы с представлением показателей техногенных и пожарных рисков в векторно-матричной форме. Показаны возможности использования полученных показателей пожарного риска при обеспечении пожарной безопасности.

Ключевые слова: техногенный риск, пожарный риск, социотехническая система, случайный Марковский процесс, показатели эффективности.

Yu.V. Prus, A.R. Kolesnikova, E.A. Klepko, V.M. Shapovalov

MODELING THE STRUCTURE AND DYNAMICS OF ANTHROPOGENIC AND FIRE RISK IN SOCIO-TECHNICAL SYSTEMS

Proposed Markov dynamic model of sociotechnical systems with indicators of anthropogenic and fire risks in vector-matrix form. Possibility of using the obtained indicators of fire risk while ensuring fire safety.

Key words: technogenic risk, fire risk, sociotechnical system, random Markov process, the performance indicators.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 15 июня 2014 г.

Методология оценки рисков получает все более широкое распространение при обеспечении безопасности различных систем – социальных, технических, экологических и других [1-3].

Понятийный аппарат теории техногенных и пожарных рисков находится в стадии становления, наиболее развиты в настоящее время представления о природе пожарных рисков. Пожарные риски представляют собой, в соответствии с [4, 5], комплексные показатели пожарной опасности для различных объектов защиты, включающие как вероятностные характеристики возникновения пожаров, так и их возможные последствия. Пожарные риски являются ключевыми понятиями общей теории пожарной безопасности, достаточную популярность получило представление о том, что функционирование ***системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ)*** может быть построено на основе так называемого "управления пожарными рисками" [3-6]. Под этим достаточно неудачным с точки зрения методологии термином понимается планирование и осуществление комплекса мероприятий различного характера (инженерно-технического, экономического, социального и пр.), ориентированных на снижение пожарных рисков до допустимых значений, обоснованных как социально-экономическими условиями, так и научно-техническими возможностями.

Показатели "пожарных рисков" в системах обеспечения пожарной безопасности играют, с точки зрения теории управления, роль некоторых целевых функций при управлении [6]. Такой подход к управлению в области пожарной безопасности обусловливает потребности в совершенствовании методик прогнозирования рисков, а также в развитии теоретически и экспериментально обоснованной теории пожарных рисков.

Основные направления развития теории пожарных рисков сформулированы в работах [4, 5], там же впервые введено понятие о структуре пожарных рисков. Становится очевидным, что для повышения адекватности моделей, описывающих риски для реальных объектов, требуется преодоление ограниченности традиционно применяемой скалярной модели (риск как произведение ущерба на вероятность), что возможно лишь при введении некоторых новых тензорных (векторных и матричных) характеристик рисков.

Основная цель представляемой работы заключалась в построении динамической модели социотехнической системы на основе рассмотрения случайных процессов Марковского типа, с представлением в векторно-матричной форме совокупности показателей пожарных и иных техногенных рисков.

Моделирование источников техногенных угроз в социотехнической системе

Представим социотехническую систему ориентированным графом, множество вершин O которого соответствуют множеству находящиеся на некоторой территории объектов, а множество дуг V отражает попарное взаимодействие между ними:

$$O = \{O, V\}; \qquad (1)$$
$$O = \{o_i\}, \quad i = \{1, \dots, N\};$$
$$V = \{v_{ij}\}, \quad v_{ij} = (o_i, \dots, o_j).$$

Приведём исходные положения модели, описывающей динамику изменения состояний взаимодействующих объектов социотехнической системы.

1. Влияние объекта o_i на объект o_j складывается из отдельных видов k воздействий, что изображается соответствующим расщеплением дуг:

$$v_{ij} = \sum_{k=1}^{M} v_{ij}^k \ , \quad k = \{1, \dots, M\}. \qquad (2)$$

2. Объект o_i обладает свойством причинять ущерб объекту o_j вследствие воздействий v_{ij}^k негативных факторов различного вида. Результирующее воздействие определенного вида k может быть представлено совокупностью воздействий от всех источников:

$$v_j^k = \{v_{ij}^k, \dots, v_{ij}^k\}, \quad i = \{1, \dots, N\}. \qquad (3)$$

3. В соответствии с проявлением негативных факторов во времени различаются постоянные и дискретные воздействия, которые подразделяются на регулярные и стохастические.

4. Постоянно действующие факторы обусловлены функционированием объекта в штатном режиме (например, экологический ущерб от загрязнения окружающей среды вследствие промышленных выбросов). При этом объект o_i является непрерывно действующим источником вреда для объекта o_j.

5. Дискретно действующие факторы обусловлены регулярными либо стохастическими переходами объекта o_i из штатного в нештатный режим функционирования либо в аварийное состояние. В последнем случае объект o_i становится источником опасности для других объектов (он может являться источником опасности и для себя).

6. Подвергающийся опасности объект o_j характеризуется определённой степенью уязвимости (обратная характеристика – защищённость) к определённого вида воздействиям v_{ij}^k. В основу понятия "уязвимость" заложено представление о возможности возникновения различного рода неблагоприятных последствий для объекта o_j – потерь, утрат (имущества, финансов, здоровья, жизни и др.) в результате опасного события или иного негативного воздействия.

7. Ущерб для объекта o_i связан с изменением его состояния и может быть представлен как скалярной, так и векторной величиной. Для каждого вида неблагоприятных последствий можно ввести некоторую шкалу с соответствующим непрерывным или дискретным диапазоном значений ущерба, которую можно назвать "спектром последствий".

Моделирование рисков в социотехнической системе на основе скалярного представления

Рассмотрим случай непрерывного воздействия неблагоприятных факторов, когда каждый объект o_i является постоянно действующим источником вреда для объекта o_j.

Совокупный ущерб для объекта o_j в течение некоторого промежутка времени Δt будем рассматривать как результат всех видов негативных воздействий от всех источников:

$$\delta U_j\left(v_j^1, \dots, v_j^k\right). \tag{4}$$

Вклад от каждого воздействия v_{ij}^k в совокупный ущерб пропорционален длительности и интенсивности этого воздействия. Интенсивность совокупных потерь для объекта o_j может быть представлена как:

$$\dot{U}_j = \frac{\delta U_j}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{M} \frac{\partial U_j}{\partial v_{ij}^k} \frac{\partial v_{ij}^k}{\partial t},$$
$$i = \{1, \dots, N\}, \quad k = \{1, \dots, M\}. \tag{5}$$

Ущерб для объекта o_j от определённого вида негативного воздействия в течение некоторого промежутка времени Δt можно представить как:

$$\delta U_j^k(\, v_{ij}^k, \dots, v_{ij}^k), \tag{6}$$

и соответствующая интенсивность потерь:

$$\dot{U}_j^k = \frac{\delta U_j^k}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\partial U_j}{\partial v_{ij}^k} \frac{\partial v_{ij}^k}{\partial t}, \quad i = \{1, \dots, N\}. \tag{7}$$

Из данного общего потока можно выделить потери для объекта o_j, обусловленные воздействием вида k со стороны объекта o_i,

$$\delta U_j^{k_i} = \frac{\partial U_j}{\partial v_{ij}^k} \; \partial v_{ij}^k, \tag{8}$$

и их интенсивность:

$$\dot{U}_j^{k_i} = \frac{\partial U_j}{\partial v_{ij}^k} \frac{\partial v_{ij}^k}{\partial t} = \frac{\partial U_j}{\partial v_{ij}^k} \; \dot{v}_{ij}^k. \tag{9}$$

В соответствии с вышеприведёнными исходными положениями, первый сомножитель в (8) и (9) представляет количественную характеристику уязвимости объекта o_j к непрерывным воздействиям вида k со стороны объекта o_i, второй сомножитель характеризует меру этого воздействия за некоторый период времени в (8), а в (9) – его интенсивность. Тогда выражение (8) определяет ожидаемый ущерб за некоторый период времени Δt, а (9) – среднюю интенсивность потерь.

В рассмотренном случае о "риске" непрерывного воздействия неблагоприятных факторов говорить бессмысленно, поскольку имеем дело с достоверными событиями причинения объекту o_j вреда различными источниками.

Рассмотрим теперь влияние дискретных воздействий на объект o_j со стороны объекта o_i. В качестве меры уязвимости объекта o_j выберем средний ожидаемый ущерб от воздействия негативных факторов вида k при возникновении опасных событий на объекте o_i:

$$\langle U_j^{k_i} \rangle = \gamma_j^k \; \frac{1}{L} \sum_{l=1}^{L} U_j^{k_i^l}, \tag{10}$$
$$l = \{1, \dots, L\}, \quad 0 \le \gamma_j^k \le 1,$$

где символами l и L обозначены порядковый номер и общее количество указанных событий, произошедших за некоторый временной интервал.

Следует отметить, что в (10) с использованием коэффициента γ_j^k учитывается влияние на уязвимость и величину ожидаемого ущерба наличия на объекте систем защиты от соответствующих видов опасности и состояние их готовности к компенсации соответствующих угроз.

При выборе подходов к моделированию необходимо учитывать характер наблюдаемых стохастических процессов, проводя качественную оценку ожидаемой частоты опасных событий ("достаточно часто", либо "очень редко") в течение выбранного временного интервала.

При моделировании стохастических процессов первого рода в качестве характеристики достаточно высокой частоты возникновения угроз следует выбрать интенсивности λ_i^k случайных потоков опасных событий. Вклад в ожидаемый ущерб, обусловленный отдельным случайным потоком опасных событий:

$$\Delta U_j^{k_i} = \langle U_j^{k_i} \rangle \, \lambda_i^k \Delta t. \tag{11}$$

Соответствующая (11) интенсивность потерь, аналогично (9), определяется выражением:

$$\dot{U}_j^{k_i} = \langle U_j^{k_i} \rangle \, \lambda_i^k. \tag{12}$$

Совокупный ущерб и интенсивность совокупных потерь, в соответствии с (3)-(5), с учётом общего совокупного воздействия негативных факторов от всех источников:

$$\Delta U_j = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{M} \langle U_j^{k_i} \rangle \, \lambda_i^k \, \Delta t \, , \tag{13}$$

$$\dot{U}_j = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{M} \langle U_j^{k_i} \rangle \, \lambda_i^k. \tag{14}$$

Выражения (13) и (14) следует трактовать как математическое ожидание ущерба за некоторый период времени и среднюю интенсивность потерь для объекта o_j. Применение понятия "риска" в подобных случаях некорректно, поскольку имеем дело с незначительно различающимися вследствие флуктуаций реализациями случайного процесса.

При моделировании стохастических процессов второго рода необходимо производить оценку вероятностей P_i^k возникающих редких опасных событий. Понятие риска для объекта o_j, становится уместным, поскольку в таком случае имеется неопределённость, связанная с возможностью возникновения негативных последствий опасного события. В качестве меры риска обычно принято использовать математическое ожидание потерь в течение определённого временного интервала, определяемого произведением среднего ожидаемого ущерба на вероятность возникновения угрозы:

$$U_j^{k_i} = \langle U_j^{k_i} \rangle \, P_i^k. \tag{15}$$

Однако существует иной подход, обоснованный в [1], согласно которому риск следует рассматривать как композицию двух событий. Первое событие, характеризуемое вероятностью P_i^k, состоит в возникновении опасного события на объекте o_i. Второе событие связано с его последствиями для объекта o_j, которые характеризуются ожидаемым ущербом $\langle U_j^{k_i} \rangle$. Такой подход показал свою продуктивность при рассмотрении систем, представляющих достаточно большие множества однотипных объектов, поскольку позволяет вводить различные виды интегральных рисков [1].

При рассмотрении систем, состоящих из достаточно большого количества однотипных объектов, возможно введение некоторых интегральных характеристик ущерба, приходящегося на один из элементов системы в течение определённого временного интервала Δt. Объединение по источникам в соответствии с (4) позволяет определить математическое ожидание потерь, обусловленных негативными воздействиями вида k:

$$U_j^k = \sum_{i=1}^{N} \langle U_j^{k_i} \rangle P_i^k. \qquad (16)$$

Проведение суммирования по видам опасности позволяет получить для математического ожидания потерь, обусловленных общим совокупным воздействием опасных событий, следующее выражение:

$$U_j = \sum_{k=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \langle U_j^{k_i} \rangle P_i^k. \qquad (17)$$

Моделирование рисков в социотехнической системе на основе векторно-матричного представления

Описанный подход и выражения (8)-(17) применимы в случае представления ущерба одномерной величиной с непрерывным или дискретным спектром значений. Проведем аналогичное моделирование последствий негативных воздействий для случая, когда ущерб выражается в виде некоторого "вектора последствий" в некотором многомерном пространстве, базис которого составляют отдельные шкалы с соответствующим непрерывным или дискретным спектром значений для отдельного вида компонент ущерба.

Введение "вектора последствий" возможно на основе сравнения состояний объекта до и после воздействия негативных факторов. Для введения "вектора последствий" в подобных случаях предлагается предварительно определить набор возможных состояний объекта:

$$i = \{1, \dots, G\}.$$

Тогда текущее состояние объекта описывается вектором:

$$\vec{p}_j = \left(p_1^j, \dots, p_i^j, \dots, p_G^j\right), \qquad (18)$$

где компоненты p_i^j – вероятности пребывания j-го объекта в i-м состоянии.

Изменение вектора состояния за некоторый интервал времени Δt определяется как соответствующий "вектор последствий":

$$\overrightarrow{\Delta p_j} = \vec{p}_j(t) - \vec{p}_j(t + \Delta t). \qquad (19)$$

Изменение состояний j-го объекта происходит вследствие некоторого негативного воздействия вида k со стороны объекта o_i. При моделировании предлагается применить математический аппарат теории случайных процессов Марковского типа с дискретными состояниями. В зависимости от вида проявления негативных факторов во времени, его можно представить либо непрерывным во времени Марковским процессом, либо дискретным, то есть Марковской цепью.

При непрерывном воздействии негативных факторов вида k со стороны объекта o_i изменение компонент вектора состояния объекта o_j пропорционально длительности и интенсивности воздействия v_{ij}^k, а также их чувствительности к данному воздействию. Интенсивность переходов между смежными состояниями l и s определяется произведением некоторого коэффициента, характеризующего уязвимость к воздействиям вида k, и интенсивности этого воздействия:

$$\chi_{ls}^{k_i} = \eta_{ls}^k \, \dot{v}_{ij}^k. \qquad (20)$$

Для определения интенсивности переходов необходим учёт общего совокупного воздействия негативных факторов от всех источников. Объединение по источникам неблагоприятных воздействий вида k позволяет определить соответствующий вклад в интенсивность переходов:

$$\chi_{ls}^{k} = \eta_{ls}^{k} \sum_{i=1}^{N} \dot{v}_{ij}^{k} = \eta_{ls}^{k} \dot{v}_{j}^{k}. \qquad (21)$$

Дальнейшее суммирование по видам опасности приводит к следующему выражению для интенсивности переходов:

$$\chi_{ls} = \sum_{k=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \eta_{ls}^{k} \dot{v}_{ij}^{k} = \sum_{k=1}^{M} \eta_{ls}^{k} \dot{v}_{j}^{k}. \qquad (22)$$

Изменение вектора состояния объекта и вектора последствий во времени описывается уравнениями Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases} \dot{p}_1^j = -p_1^j \sum_{i=2}^{G} \chi_{1i} + \sum_{i=2}^{G} p_i^j \chi_{i1} \\ \vdots \\ \dot{p}_r^j = -p_r^j \sum_{i=1,i\neq r}^{G} \chi_{ri} + \sum_{i=2,i\neq r}^{G} p_i^j \chi_{ir} \\ \vdots \\ \dot{p}_G^j = -p_G^j \sum_{i=1}^{G-1} \chi_{Gi} + \sum_{i=1}^{G-1} p_i^j \chi_{iG} \end{cases} \qquad (23)$$

Для представления изменения вектора состояния объекта и вектора последствий в векторно-матричной форме введём "матрицу ущерба" $\boldsymbol{U_j}$, которая представляет собой транспонированную матрицу системы (23):

$$\boldsymbol{U_j} = \begin{pmatrix} -\sum_{i=2}^{G} \chi_{1i} & \cdots & \chi_{1r} & \cdots & \chi_{1G} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \chi_{r1} & \cdots & -\sum_{i=1,i\neq r}^{G} \chi_{ri} & \cdots & \chi_{rG} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \chi_{G1} & \cdots & \chi_{Gr} & \cdots & -\sum_{i=1}^{g-1} \chi_{Gi} \end{pmatrix} \qquad (24)$$

Используя вновь введённую матрицу, представим в соответствии с (23) и (24) вектор последствий негативных воздействий на объект o_j за малый интервал времени Δt в следующем виде:

$$\overrightarrow{\Delta p_J} = \overrightarrow{p_J} \, \boldsymbol{U_j} \, \Delta t. \qquad (25)$$

Изменение отдельных компонент вектора состояния в (25) следует трактовать как ожидаемые потери соответствующего вида.

При моделировании изменения компонент вектора состояния объекта o_j, обусловленных дискретными воздействиями со стороны объекта o_i, также необходимо ввести коэффициенты η_{ls}^{k}, характеризующие уязвимость к соответствующему негативному воздействию и влияющие на вероятности перехода между состояниями l и s.

В случае достаточно высокой частоты возникновения угроз при моделировании следует ввести интенсивность случайного потока опасных событий λ_i^k на объекте o_i , и тогда интенсивность переходов между смежными состояниями l и s можно представить в виде произведения указанного коэффициента и общего множителя, характеризующего интенсивность случайного потока событий λ_i^k:

$$\chi_{ls}^{k_i} = \eta_{ls}^{k}\,\lambda_i^k\ . \tag{26}$$

Объединение по источникам позволяет определить интенсивности переходов, обусловленных негативными воздействиями вида k:

$$\chi_{ls}^{k} = \eta_{ls}^{k}\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i^k. \tag{27}$$

Проведение суммирования по видам опасности позволяет получить следующее выражение для интенсивности переходов между состояниями, обусловленными общим совокупным воздействием опасных событий от всех источников:

$$\chi_{ls} = \sum_{k=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\eta_{ls}^{k}\lambda_i^k. \tag{28}$$

Изменение вектора состояния объекта и вектора последствий во времени также находится из решения системы (23) уравнений Колмогорова-Чепмена. При этом изменение отдельных компонент вектора состояния в (25) следует трактовать как математическое ожидание соответствующего вида потерь за период времени Δt. Поскольку имеем дело с реализациями случайного процесса, применение понятия "риска" в подобных случаях также не имеет обоснования.

При моделировании редко возникающих опасных событий вида k, представляющих угрозу для объекта o_j, необходимо использовать вероятности их появления P_i^k на объекте o_i в течение определённого временного интервала Δt.

Условные вероятности переходов между смежными состояниями l и s в случае возникновения угрозы вида k представимы в виде характеризующих уязвимость объекта o_j к данному негативному воздействию коэффициентов η_{ls}^k, составляющих стохастическую матрицу:

$$\Pi_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}} = \begin{pmatrix} \eta_{11}^k & \cdots & \eta_{1G}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{G1}^k & \cdots & \eta_{GG}^k \end{pmatrix}. \tag{29}$$

При возникновении угрозы вида k вследствие возникновения опасного события на объекте o_i происходит переход объекта o_j из начального состояния, представленного вектором $\overrightarrow{p_j^0}$, в новое состояние, характеризуемое вектором $\overrightarrow{p_j^1}$:

$$\overrightarrow{p_j^1} = \overrightarrow{p_j^0}\Pi_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}}. \tag{30}$$

Тогда ущерб, нанесённый объекту o_j в результате возникновения рассматриваемой угрозы, представляется соответствующим "вектором последствий":

$$\overrightarrow{\Delta p_j} = \overrightarrow{p_j^0} - \overrightarrow{p_j^1} = \overrightarrow{p_j^0}\left(\boldsymbol{E} - \Pi_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}}\right) = \overrightarrow{p_j^0}\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}}. \tag{31}$$

Вектор (31) определяет изменения начальных вероятностей нахождения объекта в различных состояниях при возникновении угрозы. Его компоненты характеризуют перераспределение вероятностей нахождения в соответствующих состояниях, причём положительные компоненты представляют условные вероятности переходов в определённые состояния, а отрицательные – выходов из них. Для определённого начального "наилучшего" состояния, заданного вектором (1, 0,…, 0), положительные компоненты (31) по смыслу представляют вероятности определённого вида ущерба, отрицательная – вероятность отрицательных последствий.

Для обозначения разности между единичной и стохастической матрицами в (31) целесообразно ввести "матрицу ущерба", представляющую оператор перехода от вектора начального состояния к вектору последствий:

$$\boldsymbol{U_j^{k_i}} = \begin{pmatrix} 1-\eta_{11}^{k} & \cdots & -\eta_{1G}^{k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\eta_{G1}^{k} & \cdots & 1-\eta_{GG}^{k} \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Используя вновь введённую матрицу, представим вектор последствий в виде произведения вектора начального состояния на матрицу ущерба:

$$\overrightarrow{\Delta p}_j = \overrightarrow{p_j^0}\, \boldsymbol{U_j^{k_i}}. \quad (33)$$

Возникает вопрос об интерпретации вектора последствий для объекта o_j с учётом вероятности P_i^k возникновения угрозы вида k вследствие соответствующего опасного события на объекте o_i.

В качестве меры риска можно предложить по аналогии с рассмотренными выше ситуациями использовать некоторый "вектор вероятных потерь", пропорциональный вектору последствий возникновения рассматриваемой угрозы:

$$\overrightarrow{\Delta u}_j = \overrightarrow{\Delta p}_j\, P_i^k. \quad (34)$$

Компоненты вектора вероятных последствий представляют произведение условных вероятностей изменения состояний при переходе и вероятности возникновения в течение определённого временного интервала Δt инициирующего этот переход события:

$$\overrightarrow{\Delta u}_j = \left(\Delta u_1^j, \dots, \Delta u_i^j, \dots, \Delta u_G^j\right) = \left(\Delta p_1^j\, P_i^k, \dots, \Delta p_i^j\, P_i^k, \dots, \Delta p_G^j\, P_i^k\right). \quad (35)$$

Трактовать компоненты (35) как математические ожидания соответствующего вида потерь не имеет особого смысла. Наиболее логичной представляется интерпретация компонент (35) с позиций подхода, обоснованного в [5], согласно которому каждый переход следует рассматривать как композицию двух событий. Первое событие состоит в том, что объект o_j подвергается опасности вида k вследствие возникновения соответствующего опасного события на объекте o_i. Второе событие связано с возможностью возникновения для объекта o_j различных негативных последствий вследствие рассматриваемой угрозы.

В рассмотренной выше модели пространство, которому принадлежат вектор последствий (33) и вектор вероятных потерь (34), совпадает с векторным пространством векторов возможных состояний объекта. Подобный подход может быть реализован при построении моделей рисков, основанных на рассмотрении случайных процессов Марковского типа.

Дальнейшая реализация такого подхода позволяет построить динамические модели развития угроз в социотехнических системах с представлением показателей рисков в векторно-матричной форме на основе рассмотрения случайных процессов Марковского типа. Подобные модели удобны в случаях, когда имеется возможность интерпретации принадлежности отдельных связных областей векторного пространства к определённым группам состояний объекта, то есть построения фазовой диаграммы.

Однако в большинстве случаев возникает необходимость построения вектора последствий в векторном пространстве, отличном от пространства возможных состояний объекта. При моделировании рисков требуется векторное описание ущерба от угрозы вида k при возникновении соответствующего опасного события на объекте o_i. Представление ущерба в векторной форме возможно на основе введения "вектора последствий", компоненты которого отражают "набор" негативных последствий для объекта защиты. Базис рассматриваемого многомерного пространства составляют отдельные компоненты ущерба, представленные шкалами с соответствующими непрерывными или дискретными спектрами значений.

При этом следует различать "вектор ожидаемых последствий" и "вектор возможных последствий", которые связаны с возникновением, и соответственно, с возможностью возникновения, как определённого вида угроз, так и их совокупности. Также необходимо предусмотреть возможность учёта как одного из источников угроз, так и некоторой совокупности источников.

"Вектор ожидаемых последствий" характеризует ожидаемый ущерб, его компоненты представляют "набор" предполагаемых негативных последствий для объекта защиты в случае возникновения опасного события.

Для определения ущерба, ожидаемого при возникновении опасного события вида k, необходимо ввести оператор, связывающий вектор состояния объекта в момент времени, предшествующий возникновению опасного события, с "вектором ожидаемых последствий" из соответствующего векторного пространства:

$$\overrightarrow{v_j} = \overrightarrow{p_j^0}\, \boldsymbol{H_j^{k_i}}. \quad (36)$$

Компоненты θ_{ls}^{k} матрицы оператора $\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}}$ характеризуют уязвимость объекта o_j к негативному воздействию k и представляют условные вероятности возникновения последствий $s = \{1, \dots, S\}$ в зависимости от исходного состояния $l = \{1, \dots, G\}$:

$$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k_i}} = \begin{pmatrix} \theta_{11}^{k} & \cdots & \theta_{1S}^{k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{G1}^{k} & \cdots & \theta_{GS}^{k} \end{pmatrix}. \tag{37}$$

"Вектор вероятных последствий", характеризующий степень риска для объекта защиты, по аналогии с (34) можно представить следующим образом:

$$\vec{r}_j = \vec{v}_j\, P_i^k. \tag{38}$$

Компоненты вектора вероятных последствий представляют собой произведение отдельных ожидаемых негативных для объекта защиты последствий на вероятность возникновения в течение определённого временного интервала Δt соответствующего опасного события:

$$\vec{r}_j = \left(r_1^j, \dots, r_s^j, \dots, r_S^j\right) = \left(v_1^j\, P_i^k, \dots, v_s^j\, P_i^k, \dots, v_S^j\, P_i^k\right). \tag{39}$$

Компоненты (39) представляют вероятности возникновения отдельных негативных для объекта защиты событий, которые, в свою очередь, следует рассматривать как композицию двух событий. Первое событие "объект o_j подвергается опасности вида k при возникновении соответствующего опасного события на объекте o_i" имеет вероятность P_i^k. Второе событие "возможность наступления негативного последствия s для объекта o_j вследствие возникновения рассматриваемой угрозы" характеризуется условной вероятностью v_s^j.

Такая интерпретация позволяет отождествить компоненты вектора вероятных последствий как показатели отдельных рисков, а сам вектор вероятных последствий трактовать как некоторую комплексную характеристику совокупности однородных рисков.

Применение результатов моделирования при обеспечении пожарной безопасности

Применим полученные результаты для оценки эффективности функционирования основных подсистемы СОПБ – ***систем предотвращения пожаров (СПП)*** и ***противопожарной защиты (СПЗ)***. В качестве объекта защиты могут выступать люди, имущество, оборудование, здания и сооружения. Объектом, являющимся источником опасности, могут быть различные потенциально опасные объекты, технологическое оборудование, люди и т.п.

Тогда, в соответствии с (38), в качестве основного показателя функционирования СПП следует использовать вероятность P_i^k возникновения угрозы, то есть возникновения пожара и воздействия его опасных факторов на рассматриваемые объекты защиты СОПБ.

В качестве показателей функционирования СПЗ можно использовать компоненты векторов ожидаемых последствий для рассматриваемых СОПБ объектов защиты. При этом следует учитывать, что они могут быть представлены в соответствии с векторно-матричным выражением (37).

Интерпретация (29-39) позволяет сделать вывод, что для выбора оптимальных решений по обеспечению противопожарной защиты необходимо проведение анализа возможности соответствующих изменений компонент матриц операторов (37), с обязательным учётом текущего состояния объектов защиты.

В дальнейшем развитии предлагаемого подхода при моделировании рисков предполагается построение векторов ожидаемых и возможных последствий, связанных с реализацией либо соответственно с возможностью одновременной реализации нескольких угроз различного вида, инициируемых одним источником. Другое направление связано с моделированием интегральных рисков на основе учёта угроз, исходящих от некоторой совокупности источников.

Представляется перспективным применение предлагаемой модели при рассмотрении систем, состоящих из достаточно большого количества однотипных объектов. Для дальнейшего развития теории интегральных рисков необходимо перейти к моделированию поведения ансамбля, представляющего множество взаимодействующих между собой объектов, с введением векторных интегральных характеристик рисков, относящихся как к отдельным объектам, так и к группам однородных объектов.

Литература

1. ***ГОСТ Р 51897-2011.*** Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения.
2. ***Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н.*** Общая теория рисков. М.: Издательский центр "Академия", 2008. – 368 с.
3. ***Быков А.А., Порфирьев Б.Н.*** О взаимосвязи риска с родственными понятиями и терминологии риск-менеджмента // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. № 4. С. 4-12.
4. ***Пожарные*** риски // Под ред. Н.Н. Брушлинского. Вып. 1. М.: ВНИИПО МЧС России, 2014. 48 с.
5. ***Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепко Е.А.*** Основы теории пожарных рисков и её приложения. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 192 с.
6. ***Брушлинский Н.Н., Клепко Е.А., Иванова О.В.*** О детализации пожарных рисков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2011. № 1. С. 29-33.
7. ***Прус Ю.В., Колесникова А.Р., Шаповалов В.М.*** Связь понятий "пожарный риск" и "пожарная безопасность" с позиции теории управления // Матер. 26-й межд. научно-практ. конф. "Актуальные проблемы пожарной безопасности". М: ВНИИПО МЧС России, 2014. С. 340-343.