

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА КОМПРЕССОРНОГО ЦЕХА ПРИ ЭВАКУАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 622.691.4:614.841.345.6

А.Э. Кирилов, ООО «Газпром трансгаз Чайковский» (Барда, РФ), cever78@yandex.ru

В.А. Трефилов, д.т.н., проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, РФ), bg@pstu.ru

В статье представлен метод оценки безопасности персонала при эвакуации в случае пожара из помещения машинного зала газоперекачивающих агрегатов (ГПА). В основу положена математическая модель, учитывающая случайный характер изменения времени эвакуации. Предполагается, что время эвакуации людей зависит от скорости движения по эвакуационным маршрутам, в число которых входят не только стандартные эвакуационные пути, но и участки, пролегающие внутри пространств технологических отсеков ГПА: по вертикальным лестницам, средствам подмащивания и другим участкам, движение по которым по различным причинам затруднено. Кроме того, считается, что на продолжительность эвакуации влияют особенности поведения людей, скорость формирования очаговых признаков пожара, инерционность систем оповещения и управления эвакуацией, продолжительность оперативных действий персонала. Введен показатель, по которому оценивается безопасность условий эвакуации по конкретному маршруту, учитывающий вышеуказанные факторы. Составлена формула вероятности эвакуации людей из машинного зала, учитывающая показатели безопасности маршрутов движения и надежность систем защиты. Предложено реализовать принцип оценки безопасности персонала при эвакуации в формате компьютерной программы, с использованием методов имитационного моделирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЭВАКУАЦИЯ, ЭВАКУАЦИОННЫЙ МАРШРУТ, ВРЕМЯ НАЧАЛА ЭВАКУАЦИИ, ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ОПАСНЫЕ ФАКТОРЫ ПОЖАРА, ПРИЗНАКИ ПОЖАРА, ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА, КОМПРЕССОРНЫЙ ЦЕХ, ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ.

Производственные помещения компрессорных цехов (КЦ), где размещены ГПА, имеют разветвленную структуру маршрутов движения людей для обслуживания оборудования. При возникновении пожара эти маршруты могут быть использованы персоналом для эвакуации при условии, что их блокировка опасными факторами пожара (ОФП) произойдет после того, как помещение покинет последний эвакуируемый. Чтобы проверить это условие, для каждого маршрута движения используется методика оценки расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [1]. Однако модель поведения людей, заложенная в аппарате методики, не отражает

реальные аспекты этого явления. Считается, что после обнаружения пожара люди сразу начинают двигаться по эвакуационным путям, направляясь к эвакуационному выходу. Но в реальности эвакуация персонала начинается не сразу, что подтверждается исследованиями поведения людей при возникновении пожара [2–5]. Как правило, перед эвакуацией персонал предпринимает действия, направленные на остановку технологического процесса, отключение электроэнергии, противодействие пожару средствами пожаротушения. Другими словами, люди пытаются локализовать очаг пожара. Кроме того, методика не позволяет учитывать движение людей внутри

технологических аппаратов, по вертикальным лестницам, средствам подмащивания и другим участкам эвакуационного маршрута, перемещение по которому может оказаться затруднительным по разным причинам (стесненные условия, недостаточная освещенность и др.). Поэтому для разработки методов эвакуационного планирования персонала КЦ требуется метод, который учитывал бы перечисленные замечания. В решении этой задачи предлагается использовать модель оценки безопасности рабочих мест [6–10], рассчитываемой по формуле (1), где  $b_{mdi}$  – показатель безопасности  $i$ -го маршрута движения;  $\tau_{бли}$  – время блокировки  $i$ -го маршрута движения ОФП;  $t_{zi} = t_{mdi} + \tau_{нз}$  – вре-

**Kirilov A.E.**, Gazprom transgaz Tchaikovsky LLC (Barda, RF), cever78@yandex.ru

**Trefilov V.A.**, Doctor of Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University (Perm, RF), bg@pstu.ru

### Approaches to the development of the method to assess safety of the compressor station personnel in case of fire using methods of simulation modelling

This paper described the methodology for an assessment of the personnel safety during the evacuation of the engine room of a gas compressor unit. The methodology is based on a mathematical model considering randomness of changes in the evacuation time. It is considered that the evacuation time depends on the speed of walking along escape routes, including not only standard escape paths but paths that may go through machinery rooms of gas compressor units, up or down the ladders, along scaffolds and through areas where the movement may be restricted for various reasons. Apart from that it is considered that the duration of the evacuation may be affected by people's behaviors, the speed at which a fire hazard appears, the delayed action of a fire alarm system and the evacuation management system, the duration of emergency actions taken by the personnel. The index has been introduced according to which the safety of the evacuation on a specific escape route is assessed, and which considers the above mentioned factors. Moreover, the probability formula for the evacuation of employees from the engine room has been created, that also considers the factors of the safety of the routes and reliability of a protection system. The methodology has been implemented by means of a simulation model of the evacuation of people, the structure and the basic idea of which were described in the paper.

**KEY WORDS:** EVACUATION, ESCAPE ROUTE, EVACUATION START TIME, FIRE SAFETY, FIRE HAZARDS, FIRE RISKS, FIRE PROTECTION, GAS COMPRESSOR STATION, GAS TURBINES, SIMULATION MODEL, STATISTICAL TESTING.

мя эвакуации людей из помещения по  $i$ -му маршруту движения, с;  $t_{\text{мд}i}$  – время движения по  $i$ -му маршруту, с;  $\tau_{\text{нз}}$  – время начала эвакуации, с;  $\hat{C}_{t_{3i}}$  – коэффициент усечения  $t_{3i}$ ;  $\hat{\sigma}_{t_{3i}}$  – среднеквадратичное отклонение  $t_{3i}$ ;  $U_{t_3}$  – событие случайного изменения  $t_{3i}$ ;  $M(U_{t_3})$  – математическое ожидание  $U_{t_3}$ ;  $P_{ni} = t_{\text{рми}}/24$  – вероятность нахождения людей на  $i$ -м рабочем месте,  $t_{\text{рми}}$  – время нахождения людей (человека) на  $i$ -м рабочем месте.

Считается, что началом каждого эвакуационного маршрута является рабочее место. Поэтому в дальнейших рассуждениях будет принято допущение о равенстве количества эвакуационных маршрутов и рабочих мест.

Величина параметра  $\tau_{\text{бли}}$  устанавливается в ходе расчета времени нарастания ОФП на маршрутах движения к эвакуационному выходу до условия  $\tau_{\text{бли}} = \min\{t_{\text{кр(Т)}}, t_{\text{кр(пв)}}, t_{\text{кр(О}_2)}, t_{\text{кр(тр)}}\}$ , где  $t_{\text{кр(Т)}}$  – критическая продолжительность пожара по повышенной температуре;  $t_{\text{кр(пв)}}$  – критическая продолжительность пожара по превышению предельной видимости в дыму;  $t_{\text{кр(О}_2)}$  – критическая продолжительность пожара по пониженно-

му содержанию кислорода;  $t_{\text{кр(тр)}}$  – критическая продолжительность пожара по содержанию токсичных продуктов горения. Критическая продолжительность пожара по каждому из опасных факторов определяется как время достижения этим фактором критического значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола.

Критические значения по каждому из ОФП составляют [1]:

- по повышенной температуре – 70 °С;
- по тепловому потоку – 1400 Вт/м<sup>2</sup>;
- по потере видимости – 20 м;
- по пониженному содержанию кислорода – 0,226 кг/м<sup>3</sup>;
- по каждому из токсичных газообразных продуктов горения: CO<sub>2</sub> – 0,11 кг/м<sup>3</sup>, CO – 1,16·10<sup>-3</sup> кг/м<sup>3</sup>; HCL – 23·10<sup>-6</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $\tau_{\text{нз}}$  рассчитывается по формуле (2) [5], где  $t_{\text{соуз}}$  – время

срабатывания системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ), с;  $t_{\text{рч}}$  – время реакции человека, с;  $t_{\text{пр}}$  – время принятия решения, с;  $t_{\text{н}}$  – время, необходимое на подготовку к эвакуации, с;  $t_{\text{од}}$  – продолжительность оперативных действий (сообщение о пожаре, отключение оборудования и др.), с;  $K_{\text{r(соуз)}}$  – коэффициент готовности СОУЭ;  $t_{\text{нн}}$  – время образования признака пожара, с.

Величина  $t_{\text{соуз}}$  определяется в ходе эксплуатационных испытаний или по выражению

$$t_{\text{соуз}} = \sum_{j=1}^n t_j,$$

где  $t_j$  – время срабатывания  $j$ -го элемента СОУЭ, задействованного в алгоритме ее работы, с. Значение  $t_{\text{рч}}$  принимается равным 0,6 с [11]. Параметры  $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{од}}$  определяются хронометрическим методом при учебной анонси-

$$b_{\text{мд}i} = \frac{1}{\tau_{\text{бли}}} \left( \tau_{\text{бли}} - t_{3i} \left[ 1 + \frac{\hat{C}_{t_{3i}}}{\hat{\sigma}_{t_{3i}}} \exp \left[ -\frac{(U_{t_{3i}} - M(U_{t_{3i}}))^2}{2\hat{\sigma}_{t_{3i}}^2} \right] P_{ni} \right] \right) \quad (1)$$

$$\tau_{\text{нз}} = \begin{cases} t_{\text{соуз}} + t_{\text{рч}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{н}} + t_{\text{од}} & \text{при } K_{\text{r(соуз)}} \geq 0,95 \\ t_{\text{нн}} + t_{\text{рч}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{н}} + t_{\text{од}} & \text{при } K_{\text{r(соуз)}} < 0,95 \end{cases} \quad (2)$$

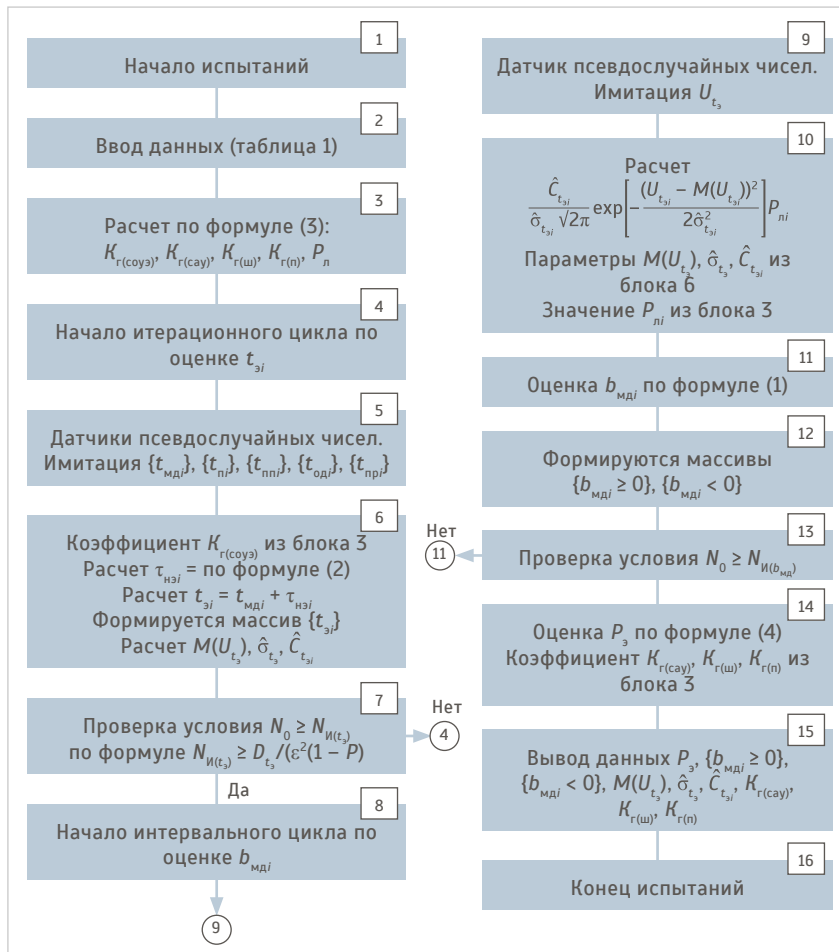


Схема алгоритма статистических испытаний имитационной модели эвакуации персонала КЦ при пожаре

рованной эвакуации или в ходе противоаварийных тренировок. Коэффициент готовности  $K_{r(соуз)}$  рассчитывается по формуле (3) [12], где  $\sum_{i=1}^n t_p$  – суммарное время исправной работы СОУЭ;  $\sum_{i=1}^n t_n$  – суммарное время вынужденного простоя СОУЭ;  $n$  – число отказов (ремонтов) СОУЭ. В случае  $K_{r(соуз)} < 0,95$  или же если СОУЭ отсутствует на объекте, считается, что человек обнаруживает пожар по задымлению или пламени [5, 13]. Принимая это во внимание,

$$K_{r(соуз)} = \frac{\sum_{i=1}^n t_p}{\sum_{i=1}^n t_p + \sum_{i=1}^n t_n} \quad (3)$$

$$P_3 = 1 - \frac{N_{мд}(b_{мд} < 0)}{N_{мд}} (1 - K_{r(сая)})(1 - K_{r(ш)})(1 - K_{r(н)}) \quad (4)$$

параметр  $t_{пп}$  предлагается определять по времени образования конвективной колонки от очага пожара. Метод определения  $t_{пп}$  указан в статье [5]. Эвакуация людей по маршруту движения считается безопасной, если  $b_{мдi} \geq 0$ .

В качестве обобщенного показателя безопасности персонала принята величина вероятности эвакуации людей из помещения КЦ. Для ее оценки необходимо рассчитать показатель безопасности  $b_{мдi}$  всех маршрутов дви-

жения людей, при этом следует учесть влияние систем защиты на процесс возникновения и развития пожароопасной ситуации (пожара). Если источником пожароопасной ситуации является авария ГПА, следует учитывать надежность системы автоматического управления (САУ), контролирующей работу ГПА, надежность штатной автоматической установки пожаротушения (АУПТ(ш)) и автоматической установки пожаротушения помещения (или здания) КЦ (АУПТ(п)), в котором установлены ГПА – см. формулу (4), где  $P_3$  – вероятность эвакуации из производственного помещения;  $N_{мд}(b_{мд} < 0)$  – число маршрутов движения, на которых  $b_{мд} < 0$ ;  $N_{мд}$  – число всех маршрутов движения;  $K_{r(сая)}$  – коэффициент готовности САУ;  $K_{r(ш)}$  – коэффициент готовности АУПТ(ш);  $K_{r(н)}$  – коэффициент готовности АУПТ(п). Коэффициенты готовности  $K_{r(сая)}$ ,  $K_{r(ш)}$  и  $K_{r(н)}$  рассчитываются аналогично (3). В зависимости от сценария пожара, который принимается экспертами за расчетный или проектный, могут учитываться и другие системы защиты (защита от статического электричества, защита от аварийного режима электросети, молниезащита, аварийно-вытяжная вентиляция, противоподымная защита и др.), которые включены в состав противопожарной защиты объекта. Условия эвакуации персонала КЦ считаются безопасными, если  $P_3 \geq 0,95$ .

Рассмотренный метод оценки условий эвакуации может быть реализован на практике в виде компьютерной программы. Это значительно упростит его использование на производственном объекте руководителями и специалистами для решения широкого спектра задач в области безопасности – например, при разработке инструкций по охране труда и пожарной безопасности, планов ликвидации аварий и инцидентов, планов пожаротушения, мер безопасности при проведении работ повышенной

Исходные данные для реализации имитационной модели эвакуации персонала КЦ в виде компьютерной программы

Вводимые данные	Характеристика данных
$N_0$ – начальное число итераций; $P$ – доверительная вероятность; $\varepsilon$ – заданная точность	Для того чтобы применить неравенство Чебышева для расчета числа итераций $N_{I(t_3)}$ , $N_{I(t_{MD})}$ , задается их приблизительное число $N_0$ ; $P$ принимается равной 0,95; $\varepsilon$ принимается равной 0,1
$T_{t_{MD}^{mini}}$ – нижний интервал значений $t_{MD}$ ; $T_{t_{MD}^{maxi}}$ – верхний интервал значений $t_{MD}$ ; $i = 1...N$	Каждый маршрут движения имеет верхний и нижний интервалы значений $t_{MD}$
$T_{\tau_{6n}^{mini}}$ – нижний интервал значений $\tau_{6n}$ ; $T_{\tau_{6n}^{maxi}}$ – верхний интервал значений $\tau_{6n}$ ; $i = 1...3$	В модели реализована имитация трех сценариев возникновения и развития пожара. Для каждого сценария определены нижний и верхний интервалы значений $\tau_{6n}$
$T_{t_{nn}^{mini}}$ – нижний интервал значений $t_{nn}$ ; $T_{t_{nn}^{maxi}}$ – верхний интервал значений $t_{nn}$ ; $i = 1...3$	В зависимости от количества пожарной нагрузки меняется величина $t_{nn}$ . Интервалы изменения величины $t_{nn}$ предусмотрены для каждого вида аварии
$T_{t_n^{mini}}$ – нижний интервал значений $t_n$ ; $T_{t_n^{maxi}}$ – верхний интервал значений $t_n$ ; $i = 1...5$	Верхний и нижний интервалы значений $t_n$ [14, 15]
$T_{t_{од}^{mini}}$ – нижний интервал значений $t_{од}$ ; $T_{t_{од}^{maxi}}$ – верхний интервал значений $t_{од}$ ; $i = 1...3$	Верхний и нижний интервалы значений $t_{од}$ . Для каждого сценария возникновения и развития пожара предусмотрены оперативные действия
$\sum t_{p(соуз)}$ , $\sum t_{p(сау)}$ , $\sum t_{p(ш)}$ , $\sum t_{p(п)}$	Суммарное время исправной работы СОУЭ, САУ, АУПТ(ш), АУПТ (п)
$\sum t_{n(соуз)}$ , $\sum t_{n(сау)}$ , $\sum t_{n(ш)}$ , $\sum t_{n(п)}$	Суммарное время вынужденных простоев СОУЭ, САУ, АУПТ(ш), АУПТ (п)
$\sum t_{отк(соуз)}$ , $\sum t_{отк(сау)}$ , $\sum t_{отк(ш)}$ , $\sum t_{отк(п)}$	Число отказов СОУЭ, САУ, АУПТ(ш), АУПТ (з)
$t_{рм}$ , $1...N_{рм}$ , $N_{рм}$ – число рабочих мест в машинном зале КЦ	Время нахождения людей на рабочих местах и число рабочих мест, на которых находятся люди, можно определить из служебной документации производственного объекта
$t_{рч} = 0,6$ с	В данном случае значение «Время реакции человека» взято из научной литературы по инженерной психологии. Однако в других источниках имеются сведения, указывающие на то, что этот параметр может принимать значение, равное нескольким минутам и даже десяткам минут [16]
$T_{t_{пр}^{mini}}$ – нижний интервал значений, $t_{пр}$ , равный 7,82 с; $T_{t_{пр}^{maxi}}$ – верхний интервал значений, $t_{пр}$ , равный 11,11 с	Время принятия решения является случайной величиной. В программе предлагается использовать верхнее и нижнее значение 95 % доверительного интервала [17]

опасности (огневые, газоопасные, пожароопасные). Программа может быть применена в виде учебно-методического материала или технического средства обучения при проведении занятий по пожарно-техническому минимуму, инструктажей и т. п. Для разработки такой компьютерной программы следует воспользоваться методами имитационного моделирования, при котором процесс эвакуации персонала заменяется вероятностной моделью. Это позволит проводить статистические испытания, имитируя различные сценарии возникновения и развития пожара, показатели надежности систем защиты, расположение людей в пространстве помещения КЦ, их поведение при пожаре и другие данные. Принципиальная

имитационная модель эвакуации персонала КЦ при пожаре приведена на рисунке в виде алгоритма.

Принцип работы модели состоит в следующем. На начальном этапе вводятся исходные данные, представленные в таблице.

Далее начинаются основные этапы статистических испытаний. Сначала рассчитываются коэффициенты готовности  $K_{r(соуз)}$ ,  $K_{r(сау)}$ ,  $K_{r(ш)}$ ,  $K_{r(п)}$ , вероятности нахождения людей на рабочих местах  $P_{ни}$ . На следующем этапе формируется массив чисел  $\{t_{эi}\}$  и производится расчет статистических параметров  $M(U)_{t_3}$ ,  $\hat{\sigma}_{t_3}$ ,  $\hat{C}_{t_3}$  (блок 6). Для этого методом случайного выпадения имитируются значения  $t_{MDi}$ ,  $t_{ни}$ ,  $t_{одi}$ ,  $t_{пni}$ ,  $\tau_{6ni}$ ,  $t_{при}$  с учетом условной таблицы (блок 5). Этот процесс обеспечивается оператором

Randon, генерирующим последовательность чисел с равномерным распределением. После каждого шага имитации производится операция  $t_{эi} = t_{MDi} + \tau_{нэ}$ , благодаря чему накапливается  $\{t_{эi}\}$ . Этот итерационный цикл повторяется до тех пор, пока не выполнится условие  $N_0 \geq N_{I(t_3)}$ , где  $N_{I(t_3)}$  – количество выполненных итерационных циклов по имитации  $t_3$  (блок 7). Для проверки условия  $N_0 \geq N_{I(t_3)}$  используется неравенство Чебышева  $N_{I(t_3)} \geq D_{t_3} / (\varepsilon^2(1 - P))$ , где  $D_{t_3}$  – дисперсия  $t_3$ . Если  $N_0$  меньше  $N_{I(t_3)}$ , число итераций доводится до условия  $N_0 \geq N_{I(t_3)}$ . После этого начинается новый итерационный цикл, в котором с помощью оператора Randon имитируется случайное событие  $U_{t_3}$ , производится имитация  $b_{MDi}$  и формируются массивы

$\{b_{мдi} \geq 0\}$ ,  $\{b_{мдi} < 0\}$  (блоки 8–12). Вычисление  $b_{мдi}$ , где  $i = 1 - N_{рм}$ , и формирование массивов  $\{b_{мдi} \geq 0\}$ ,  $\{b_{мдi} < 0\}$  проводится до выполнения условия  $N_0 \geq N_{и(b_{мд})}$  (блок 13). Принцип проверки  $N_0 \geq N_{и(b_{мд})}$  аналогичен предыдущему. Да-

лее производятся оценка  $P_3$  по формуле (4) и вывод результатов статистических испытаний. После этого статистические испытания считаются завершёнными.

Рассмотренная имитационная модель не является консерва-

тивной и может быть дополнена ветвями дополнительных вычислений в зависимости от особенностей производственного объекта, проектных сценариев развития пожара, действий персонала. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. М.: ФГУП ВНИИПО МЧС России, 2009.
2. Самошин Д.А., Холщевников В.В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 5. С. 37–51.
3. Белосохов И.Р. К проблеме формирования продолжительности времени начала эвакуации людей при пожаре // Технологии техносферной безопасности. 2011. Вып. 2 (36). 9 с.
4. Холщевников В.В., Самошин Д.А., Белосохов И.Р. и др. Парадоксы нормирования обеспечения безопасности людей при эвакуации из зданий и пути их устранения // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 3. С. 41–51.
5. Кирилов А.Э. К проблеме оценки времени начала эвакуации людей на производственных объектах. Предложение по ее решению на примере компрессорного цеха // Вестник Пермского национального иссл. политех. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15. № 19. С. 193–200.
6. Трефилов В.А. Теоретические основы безопасности человека: Курс лекций. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2006. 100 с.
7. Трефилов В.А., Костров А.Е., Лонский В.О. Управление безопасностью на производстве // Геология. Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 10. С. 79–72.
8. Трефилов В.А. Проблемы исследования безопасности в системах различного уровня // Научные исследования и инновации. 2013. Т. 7. № 1–4. С. 4–7.
9. Калугин М.А., Трефилов В.А. Автоматизированная система состояния безопасности газовой котельной // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 3. С. 59–61.
10. Костров А.Е., Трефилов В.А. Разработка автоматизированной системы управления безопасностью технологических трубопроводов // Геология. Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 12. С. 74–77.
11. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б.Ф. Ломова. М.: Машиностроение, 1982. 368 с.
12. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. 368 с.
13. Шильдс Д.Т., Бойс К., Холщевников В.В. Поведение персонала торговых комплексов при пожаре. Часть II. Действия в смоделированной ситуации «Пожар в торговом комплексе» // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14. № 3. С. 47–58.
14. Кирилов А.Э. Оценка времени движения людей по участкам эвакуации повышенной сложности // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. 2016. № 5. С. 34–41.
15. Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М., Некрасов В.П. и др. Исследование процесса эвакуации людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода // Пожарная безопасность. 2008. № 1. С. 83–88.
16. Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П. и др. Эвакуация и поведение людей на пожарах: Учеб. пособ. М.: Академия МЧС России, 2015. 262 с.
17. Самошин Д.А. Применение концепции «человек – среда – пожар» для понимания поведения персонала торговых комплексов при пожаре. Ольстер, 2004.

#### REFERENCES

1. Method for the Calculation of Predicted Values of Fire Risk at Production Facilities. Moscow, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009. (In Russian)
2. Samoshin D.A., Kholshchevnikov V.V. Evacuation Start Timing Issues. *Pozharovzryvobezопасnost' = Fire and Explosion Safety*, 2016, Vol. 25, No. 5, P. 37–51. (In Russian)
3. Belosokhov I.R. On the Issue of Forming the Duration of Evacuation Start Time of People in Cases of Fire. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezопасnosti = Technologies of Technosphere Safety*, 2011, Issue 2 (36), 9 pp. (In Russian)
4. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Belosokhov I.R., et al. Standardization Paradoxes of Ensuring People's Safety in Cases of their Evacuation from Buildings and Means of the Elimination of Such Paradoxes. *Pozharovzryvobezопасnost' = Fire and Explosion Safety*, 2011, Vol. 20, No. 3, P. 41–51. (In Russian)
5. Kirilov A.E. On the Issue of Establishing the People's Evacuation Start Time at Production Facilities. A Propose to Solve the Issue as Exemplified by a Compressor Shop. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of Perm National Research Polytechnical University. Geology. Oil and Gas and Mining Art*, 2016, Vol. 15, No. 19, P. 193–200. (In Russian)
6. Trefilov V.A. Theoretical Fundamentals of Man's Safety: A Course of Lectures. Perm, Perm Publishing House, 2006, 100 pp. (In Russian)
7. Trefilov V.A., Kostrov A.E., Lonsky V.O. Production Safety Management. *Geologiya, Geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy = Geology. Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2009, No. 10, P. 72–79. (In Russian)
8. Trefilov V.A. Problems of the Study of Safety in Systems of Different Levels. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii = Research and Innovations*, 2013, Vol. 7, No. 1–4, P. 4–7. (In Russian)
9. Kalugin M.A., Trefilov V.A. Automated Gas Boiler House Safety Condition System. *Bezопасnost' truda v promyshlennosti = Labor Safety in the Industry*, 2014, No. 3, P. 59–61. (In Russian)
10. Kostrov A.E., Trefilov V.A. Development of an Automated Process Pipeline Safety Management System. *Geologiya, Geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy = Geology. Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2010, No. 12, P. 74–77. (In Russian)
11. Engineering Psychology Reference Book. Ed. by B.F. Lomov. Moscow, Machine Engineering, 1982, 368 pp. (In Russian)
12. Akimov V.A., Lapin V.L., Popov V.M., et al. Reliability of Engineering Systems and Technology-Related Risk. Moscow, Financial Publishing House Business Express CJSC, 2002, 368 pp. (In Russian)
13. Shields D.T., Boyce K., Kholshchevnikov V.V. Behavior of Trade Complex Personnel in Cases of Fire. Part II. Actions in a Simulated Situation «Fire in a Trade Complex». *Pozharovzryvobezопасnost' = Fire and Explosion Safety*, 2005, Vol. 14, No. 3, P. 47–58. (In Russian)
14. Kirilov A.E. Assessment of People's Movement Time in Evacuation Sections of Higher Complexity. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Bezопасnost' i upravlenie riskami = Bulletin of Perm National Research Polytechnical University. Safety and Risk Management*, 2016, No. 5, P. 34–41. (In Russian)
15. Shebeko Yu.N., Gordienko D.N., Nekrasov V.P., et al. Research of the People's Evacuation Process in Cases of Fire from the Mezzanine of a Processing Line of a Gas Processing Plant. *Pozharnaya bezопасnost' = Fire Safety*, 2008, No. 1, P. 83–88. (In Russian)
16. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., et al. Evacuation and People's Behavior in Cases of Fire: Study Book. Moscow, Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2015, 262 pp. (In Russian)
17. Samoshin D.A. Use of the Concept «Man – Environment – Fire» in Order to Understand the Behavior of Trade Complex Personnel in Cases of Fire. Olster, 2004.