

УДК 622.276:[622.82+614.84]

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

## ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

А.Э. Кирилов, К.А. Черный<sup>1</sup>

ООО «Газпром трансгаз Чайковский» (617760, Россия, г. Чайковский, ул. Приморский бульвар, 30)

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

## ASSESSMENT OF FIRE SAFETY OF EVACUATION ROUTES IN INDUSTRIAL PREMISES

Albert E. Kirilov, Konstantin A. Chernyi<sup>1</sup>

Gazprom transgaz Tchaikovskiy LLC (30 Primorskiy bulvar, Tchaikovskiy, 617760, Russian Federation)

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 25.07.2018. Принята / Accepted: 24.10.2018. Опубликовано / Published: 30.11.2018

### Ключевые слова:

модель эвакуации, эвакуационные пути, эвакуация, пожарная безопасность, пожарная опасность, опасные факторы пожара, автоматические установки пожаротушения, пожарная сигнализация, системы оповещения и управления эвакуацией, диаграмма Исикавы, пожароопасная ситуация, пожар, время принятия решения, психология, действия людей при пожаре.

Изложены результаты разработки новых научно-методических принципов оценки пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений. В основе указанных принципов лежит научная методология по управлению безопасностью на производстве, разработанная на кафедре безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета. В статье рассмотрены: 1) метод построения сценариев возникновения и развития пожара на основе диаграммы Исикавы, 2) математическая модель, описывающая поэтапный процесс возникновения и развития пожара в соответствии с топологией диаграммы, 3) показатель пожарной безопасности путей эвакуации, 4) модель оценки вероятности эвакуации людей по путям эвакуации, 5) модель оценки вероятности эвакуации из производственного помещения. В перечисленных разработках учтены проблемные вопросы, связанные с особенностью поведения людей при пожаре (оперативные действия по отключению оборудования или остановке технологического процесса, скорость реакции человека на сигналы о пожаре и время принятия решения), движением людей при эвакуации внутри замкнутых или ограниченных пространств (шахты, емкости, колодцы, сосуды и др.), удаленностью рабочих мест от путей эвакуации (средства подмачивания, крановые пути, работа на высоте и др.), надежностью систем оповещения и управления эвакуацией, отсутствием четкого алгоритма построения сценариев пожара. Определены области применения научных разработок. Рассмотрен метод оценки безопасности путей эвакуации относительно огнетушащих веществ автоматических установок пожаротушения, представляющих опасность для здоровья людей, которые являются сопутствующими проявлениями опасных факторов пожара. Приведены примеры применения научных разработок в оценке пожарной безопасности путей эвакуации и построении сценария пожара на конкретном производственном объекте.

### Key words:

evacuation model, evacuation routes, evacuation, fire safety, fire danger, fire hazards, automatic fire extinguishing units, fire alarms, evacuation warning and control systems, Ishikawa diagram, fire hazardous situation, fire, decision-making time, psychology, people's actions in case of fire.

The paper presents results of the development of new scientific and methodological principles for assessing the fire safety of industrial premises evacuation routes. The basis of these principles is the scientific methodology for managing industrial safety, developed at the department of life safety at the Perm National Research Polytechnic University. Following is discussed in the paper: 1) method of modelling scenarios for fire break-out and development based on Ishikawa diagram, 2) mathematical model describing the stepwise process of fire break-out and development in accordance with diagram topology, 3) indicator of fire safety of evacuation routes, 4) model for estimating the probability of evacuation of people along through the evacuation routes, 5) model for estimating the probability of evacuation from the premises. The developments mentioned above took into account problematic issues related to the behavior of people during a fire (operational actions to turn off equipment or stop the process, speed of human response to fire signals and decision time), movement of people during evacuation inside confined or limited spaces (mines, containers, wells, vessels etc.), remoteness of workplaces from evacuation routes (scaffolding, crane tracks, work at height etc.), reliability of evacuation warning and control systems, absence of a clear algorithm for constructing fire scenarios. The areas of scientific research application are identified. A method for assessing the safety of evacuation routes in relation to fire extinguishing substances of automatic fire extinguishing units that pose a danger to human health is considered. Examples of the application of scientific developments in the assessment of evacuation routes fire safety and modelling a fire scenario at a specific production facility are given.

Кирилов Альберт Эрнестович – инженер по промышленной безопасности (тел.: +007 342 923 14 80, e-mail: cever78@yandex.ru). Контактное лицо для переписки.  
Черный Константин Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности (тел.: +007 342 219 81 73, e-mail: sms@pstu.ru).

Albert E. Kirilov – Industrial Safety Engineer (tel.: +007 342 923 14 80, e-mail: cever78@yandex.ru). The contact person for correspondence.  
Konstantin A. Chernyi (Author ID in Scopus – 52663143700) – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety (tel.: +007 342 219 81 73, e-mail: sms@pstu.ru).

## Введение

Один из основных способов защиты персонала производственных объектов от опасных факторов пожара при его возникновении – это своевременная эвакуация людей из помещения, где возник пожар. Эвакуация считается своевременной, если люди успевают покинуть помещение до того, как опасные факторы пожара блокируют пути эвакуации. По этому условию оценивается вероятность эвакуации людей по эвакуационным путям, вероятность эвакуации людей из производственного помещения, оценивается потенциальный пожарный риск. По указанному условию могут быть изменены параметры технологического процесса, характер и условия труда работников на производственном объекте.

### Модель оценки времени эвакуации людей при пожаре

Время эвакуации людей из помещения, где возник пожар  $t_{эi}$ , с, складывается из двух параметров: времени движения людей по путям эвакуации и времени начала эвакуации [1–4]:

$$t_{эi} = \tau_{нэi} + t_{эпi}, \quad (1)$$

где  $\tau_{нэi}$  – время начала эвакуации (ВНЭ), с;  $t_{эпi}$  – время движения людей по  $i$ -му пути эвакуации (ЭП), с.

Параметр  $t_{эпi}$  определяется экспериментально при проведении учебной эвакуации на конкретном производственном объекте. Могут быть использованы сведения о скоростных и временных характеристиках движения людей, полученные в ходе экспериментов по учебной эвакуации на аналогичных объектах нефтегазовой отрасли. Например, информация, полученная в ходе эксперимента по учебной эвакуации работников газоперерабатывающего завода, описанного Ю.Н. Шебеко [5]. Величина  $t_{эпi}$  может быть определена с помощью моделей движения людей в потоке, которые используются в противопожарном нормировании [1, 2, 6], если они будут адекватно описывать процесс эвакуации людей на конкретном производственном объекте с учетом особенностей трудового процесса, расположения временных и постоянных рабочих мест и других факторов.

Параметр  $\tau_{нэi}$  характеризует особенности поведения людей при пожаре. В настоящее время универсальный математический аппарат,

который бы адекватно описывал  $\tau_{нэi}$  на любом производственном объекте, не разработан [6]. Существующий метод определения  $\tau_{нэi}$  в нормативных документах, по мнению ученых, требует серьезной доработки [2, 6], поскольку не отражает многих факторов, которые влияют на поведение людей при пожаре [2–18]. Как вариант авторами предлагается рассчитывать  $\tau_{нэi}$  исходя из параметров, характеризующих психологические особенности людей, время срабатывания системы оповещения и управление эвакуацией (СОУЭ) и ее надежность [3, 4, 19–21]:

$$\tau_{нэ} = t_{соуэ} + t_{рч} + t_{пр} \text{ при } K_{г(соуэ)} \geq 0,95, \quad (2)$$

где  $t_{соуэ}$  – время срабатывания СОУЭ, с;  $t_{рч}$  – время реакции человека, с;  $t_{пр}$  – время принятия решения, с;  $K_{г(соуэ)}$  – коэффициент готовности СОУЭ.

Величина  $t_{соуэ}$  определяется в ходе ее эксплуатационных испытаний. Величины  $t_{рч}$  и  $t_{пр}$  характеризуют психологические характеристики человека и определяются по справочным данным или в ходе тестирования персонала посредством компьютерных психодиагностических комплексов, которые используются в организациях и учреждениях в целях определения профессиональных качеств работников [4, 10]. Известны работы, в которых указаны величины  $t_{пр}$ , зависящие от типа сигнала о пожаре (дым, пламя, сирена, сигнализация) [2, 6, 22–27]. Однако для использования их при расчете  $\tau_{нэi}$  персонала конкретной организации или учреждения требуется дополнительная проверка. Поэтому целесообразнее пользоваться методами диагностики, которые указывали ранее. Величина коэффициента  $K_{г(соуэ)} \geq 0,95$  говорит о том, что СОУЭ имеет высокую надежность и обеспечит функцию оповещения людей о возникновении пожара. Тогда  $\tau_{нэi}$  рассчитывается по формуле (2) при условии, что персонал проходит противопожарную подготовку должного уровня и действия работников соответствуют последовательности, характерной для человека – оператора системы «человек – машина» (см. табл. 1 в [28]).

Если  $K_{г(соуэ)} < 0,95$ , считается, что СОУЭ недостаточно надежна для выполнения функции оповещения о пожаре. Такой случай реален, и его также следует рассматривать при оценке пожарной безопасности путей эвакуации. Как поступить в этом случае? Как вариант предлагается воспользоваться

экспериментальными данными, характеризующими величину ВНЭ для конкретного контингента сотрудников. При их отсутствии величину  $\tau_{нэi}$  предлагается принять в соответствии с методикой [1] для случая отсутствия СОУЭ в зданиях.

### Показатель пожарной безопасности пути эвакуации. Модели оценки вероятностей эвакуации людей

Зачастую компоновка производственных помещений определяет организацию рабочих мест в ограниченных замкнутых пространствах, на верхних уровнях помещений, внутри технологического оборудования, коммуникаций. Выход людей на пути эвакуации с таких рабочих мест может оказаться трудоемким и значительно увеличить  $t_{эi}$  [29]. Поэтому величина  $t_{эi}$  будет рассматриваться как случайная и меняться в зависимости от перечисленных условий.

Пусть  $U_{эi}$  – параметр  $i$ -го события случайного изменения  $t_{эi}$ , с,  $M_U$  – математическое ожидание  $U_{эi}$ , с,  $\sigma_U$  – среднеквадратичное отклонение  $U_{эi}$ , с, а изменение  $t_{эi}$  характеризуется усеченным нормальным распределением. Тогда выражение

$\frac{C_U}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(U_{эi} - M_U)^2}{2\sigma_U^2}\right]$  будет описывать

случайное изменение времени эвакуации, в котором  $C_U$  – коэффициент усечения усеченного нормального распределения  $U_{эi}$ . Основываясь на модели возникновения и развития опасности, разработанной В.А. Трефиловым [30, 31], преобразуем вышеуказанное выражение в модель оценки пожарной безопасности путей эвакуации:

$$b_{эni} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[ \tau_{бл} - t_{эi} \left( 1 + \frac{C_U}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{(U_{эi} - M_U)^2}{2\sigma_U^2}\right] P_U \right) \right], \quad (3)$$

где  $b_{эni}$  – показатель пожарной безопасности  $i$ -го эвакуационного пути;  $\tau_{бл}$  – время блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара или их сопутствующими проявлениями, с;  $P_U$  – вероятность возникновения  $U_{эi}$ .

Область применения (3) охватывает следующие эвакуационные ситуации:

1. Движение людей при эвакуации внутри замкнутых ограниченных пространств (отсеки технических аппаратов, технологических конструкций, емкостей сосудов, воздухопроводов, вентиляционных каналов и др.). Вероятность  $P_U$  для данного случая определяется исходя из выражения  $P_U = t_{см}/24$ , где  $t_{см}$  – время нахождения людей на рабочих местах в течение смены, если нахождение людей на указанных рабочих местах является нормальным трудовым процессом (осмотр, регулировка, контроль параметров и др.), ч. Если же нахождение людей связано с устранением неисправностей (ремонт), то вероятность  $P_U$  определяется исходя из закона надежности, описывающего вероятность отказа устройства, аппарата и другого оборудования. Иными словами, в случае возникновения отказа считается, что персонал примет меры по его устранению, т.е. будет находиться непосредственно там, где расположено техническое устройство. В случае демонтажа технического устройства для его восстановления вне пределов помещения, в отношении которого проводится оценка  $b_{эni}$ , величина  $t_{см}$  будет означать время замены технического устройства, определяемое в часах.

2. Движение людей при эвакуации с помощью приспособлений (спуск по вертикальным конструкциям зданий с помощью привязей или других страховочных приспособлений, спуск с подъемных сооружений и т.п.). Вероятность  $P_U$  для данного случая определяется так же, как и в первом случае.

3. Выполнение действий по отключению электрооборудования, принудительной остановке технологического процесса, аварийного сброса пожароопасных веществ в аварийные емкости, запуск автоматических установок пожаротушения, спасение пострадавших. Здесь вероятность  $P_U$  приравнивается 1, если оперативные действия являются обязанностью персонала и указаны в локальных нормативных документах (стандарты организации, инструкции, планы мероприятий по локализации и ликвидации аварий и т.п.). В противном случае  $P_U$  определяется по результатам тестирования персонала, которое проводится в учреждениях и организациях для оценки профессиональных компетенций сотрудников. Принято допущение, что оперативные действия

предпримут работники, имеющие высокую степень готовности к риску (методика Шуберга):

$$P_U = \frac{N_{p(v)}}{N_{\text{общ}}}, \quad (4)$$

где  $N_{p(v)}$  – количество работников, имеющих высокую степень готовности к риску;  $N_{\text{общ}}$  – общее количество тестируемых.

Пожарная безопасность пути эвакуации считается обеспеченной, если  $b_{\text{эп}i} > 0$ .

Определив величину  $b_{\text{эп}}$  относительно каждого рабочего места, рассчитаем вероятность эвакуации людей по  $i$ -му пути эвакуации  $P_{\text{эп}i}$  по формуле [4]

$$P_{\text{эп}i} = 1 - \frac{N_{\text{рми}}(b_{\text{эп}i} \leq 0)}{N_{\text{рм}}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{рми}}(b_{\text{эп}} \leq 0)$  – количество  $i$ -х рабочих мест, выход людей с которых осуществляется на  $i$ -й путь эвакуации, не отвечающих принятому условию пожарной безопасности, т.е.  $b_{\text{эп}} \leq 0$ ;  $N_{\text{рм}}$  – общее количество рабочих мест, имеющих выход на  $i$ -й путь эвакуации. Если для расчета  $P_{\text{эп}}$  используются методы имитационного моделирования и статистических испытаний, то  $N_{\text{рми}}(b_{\text{эп}} \leq 0)$  в этом случае – это количество итераций, при которых  $b_{\text{эп}} \leq 0$ , а  $N_{\text{рми}}$  – общее количество итераций.

Величина вероятности эвакуации людей из производственного помещения  $P_{\text{э}i}$  находится по выражению [4]

$$P_{\text{э}i} = \begin{cases} 0,999, & \text{если } \prod_{i=1}^n b_{\text{эп}i} > 0, \\ 1 - \frac{N_{\text{эп}}(b_{\text{эп}} \leq 0)}{N_{\text{эп}}} \prod_{i=1}^n (1 - K_{\text{г}i}), & \text{если } \prod_{i=1}^n b_{\text{эп}i} \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $N_{\text{эп}}(b_{\text{эп}} \leq 0)$  – количество эвакуационных путей, которые не отвечают условиям пожарной безопасности, т.е.  $b_{\text{эп}} \leq 0$ ;  $N_{\text{эп}}$  – количество всех эвакуационных путей в помещении;  $K_{\text{г}i}$  – коэффициент готовности  $i$ -й системы противопожарной защиты, функцией которой является обеспечение безопасности эвакуации людей.

Некоторые виды огнетушащих веществ, которые используются в автоматических установках пожаротушения (АУПТ), могут оказывать вредное воздействие на людей, если они окажутся в зоне их действия [32]. Проверка безопасности путей эвакуации относительно воздействия огнетушащих составов АУПТ

проводится следующим образом. По технической документации (проект, результаты огневых испытаний установки) определяется время выхода АУПТ на рабочий режим. Этот параметр подставляется вместо  $\tau_{\text{бл}}$  в модель (3). Тогда формула (5) покажет вероятность воздействия на людей огнетушащих веществ АУПТ для конкретного эвакуационного пути, формула (6) – вероятность воздействия огнетушащих веществ АУПТ относительно всех эвакуационных путей производственного помещения.

### Метод построения сценария пожара

При расчете  $\tau_{\text{бл}}$  очень важно определить все возможные сценарии возникновения и развития пожара (далее – сценарий пожара, сценарий), которые могут возникнуть на производственном объекте, и выбрать из них наиболее опасные. Для выполнения этой задачи предлагается воспользоваться диаграммой Исикавы (далее – диаграмма пожара), которая позволит установить все возможные факторы и условия, способные образовать причинно-следственные связи для возникновения и развития пожара, а также условия, которые противодействуют развитию этого процесса [3, 4]. Совершенно очевидно, что каждый сценарий пожара будет обладать той или иной мерой реализации на производственном объекте. Математическая модель, посредством которой оценивается мера реализации сценария пожара, выражена следующей формулой:

$$d_{ij} = \frac{x(t)_{ij} \left( 1 + \frac{C_x}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(x(t)_{ij} - M_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] Q_x \right) - x_{\text{доп}}}{x_{\text{доп}}}, \quad (7)$$

где  $d_{ij}$  – показатель опасности  $i$ -й стадии  $j$ -го сценария пожара;  $x(t)_{ij}$  – текущее значение параметра, характеризующего опасное событие  $i$ -й стадии  $j$ -го сценария пожара;  $C_x$  – коэффициент усечения усеченного нормального закона распределения  $x(t)_{ij}$ ;  $M_x$  – математическое ожидание случайной величины  $x(t)_{ij}$ ;  $\sigma_x$  – среднеквадратичное отклонение случайной величины  $x(t)_{ij}$ ;  $Q_x$  – вероятность возникновения  $x(t)_{ij}$ ;  $x_{\text{доп}}$  – допустимое значение  $x(t)_{ij}$ .

$C_x$ ,  $M_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $Q_x$  рассчитываются исходя из статистических данных. При их отсутствии указанные параметры определяются посредством использования методов имитационного моделирования и статистических испытаний.

Таблица 1

Типовые характеристики  $x(t)_{ij}$ ,  $Q_x$  и рекомендации по их использованию в модели (7)

Характеристика $x(t)_i$	Наименование параметра $x(t)_i$	Выбор $Q_x$
Разрыв трубопроводов с взрывопожароопасными веществами вследствие возникновения скачка давления	Величина давления в трубопроводе [33–36]	На основе модели «нагрузка – прочность» [37]
	Толщина стенки трубопровода [33–36]	На основе нормального распределения (характеризует постепенный отказ, старение материала) [38]
Разрушение сосуда, резервуара, емкости, в которых содержатся взрывопожароопасные вещества	Величина давления в сосуде, резервуаре, емкости [33–36]	На основе модели «нагрузка – прочность»
	Толщина стенки сосуда, резервуара, емкости [33–36]	Отказ, описываемый нормальным распределением
Возникновение электрической дуги или искрения (короткое замыкание) в зоне образования горючей среды	Величина тока в цепи электрооборудования	При отказе электрооборудования выбирается экспоненциальное распределение
	При проведении электросварочных работ в качестве $x(t)_i$ выбирается величина расстояния от места проведения сварочных работ до участка производственного помещения, где образовалась горючая среда	Вероятность проведения электросварочных работ в производственном помещении
Нагрев частей оборудования, агрегатов, установок до температуры воспламенения горючего вещества	Температура нагреваемых частей оборудования до температуры воспламенения горючего вещества. Параметр работы, оборудования, который достоверно способствует нагреву: частота вращения, величина тока и др. (определяется по служебной документации)	Если нагрев частей установки, оборудования, агрегатов является нормальным состоянием при их функционировании, то $Q_x$ принимается равной 1. Если нагрев происходит вследствие отказа, то $Q_x$ принимается в зависимости от закона надежности для каждого типа отказов

Последний множитель в модели (7) характеризует вероятность возникновения  $x(t)_{ij}$ . Как правило, это функция надежности технического объекта (устройства, аппарата и др.), отказ которого достоверно приводит к аварии и впоследствии к пожару. В зависимости от характера распределения отказов указанный множитель может быть выражен следующими законами надежности: экспоненциальным законом, нормальным законом, гамма-законом и др. Если моделируется разрыв трубопровода, сосуда, резервуара, используется модель «нагрузка – прочность». В табл. 1 приведены характеристики  $x(t)_{ij}$ ,  $Q_x$  которые предлагается использовать для построения сценариев пожара на производственных объектах.

Для каждого сценария пожара, который моделируется по формуле (7), рассчитывается  $\tau_{\text{бл}}$ . Самым неблагоприятным сценарием пожара, относительно которого будет оцениваться пожарная безопасность путей эвакуации, выбирается тот, при котором  $\tau_{\text{бл}}$  составит самое меньшее значение из всех рассмотренных.

### Апробация научных разработок

Показатель (3) апробирован при оценке пожарной безопасности путей эвакуации, расположенных в здании газоперекачивающих агрегатов (ГПА) Бардымского линейного

производственного управления – филиала ООО «Газпром трансгаз Чайковский». На указанные пути эвакуации предусмотрен выход с рабочих мест персонала цеха, занятого обслуживанием агрегата и других технических устройств (рис. 1). Время движения людей по эвакуационным путям (ЭП) рассчитывалось исходя из следующих экспериментальных данных [5]: горизонтальные пути – 350 м/мин; вертикальные лестницы (спуск) – 48,5 м/мин; наклонные лестницы (спуск) – 100 м/мин.

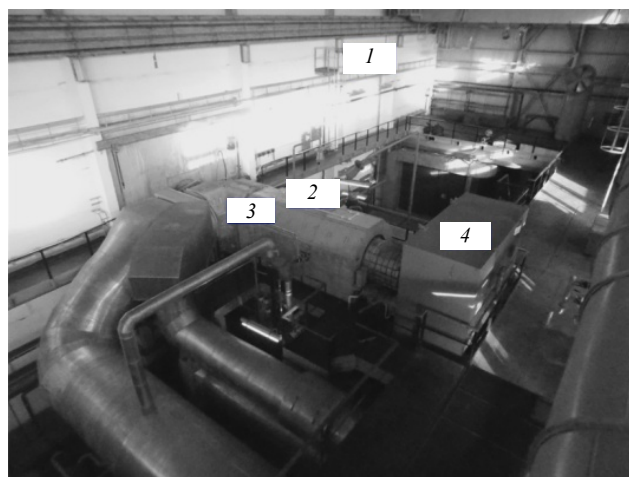


Рис. 1. Рабочие места персонала цеха на площадке обслуживания газоперекачивающего агрегата: 1 – на площадке обслуживания пожарных извещателей (ПИ); 2 – в отсеках правой стороны ГПА; 3 – в отсеках левой стороны ГПА; 4 – в воздухозаборной камере

Время срабатывания СОУЭ по результатам испытаний составило 4,5 с, коэффициент готовности  $K_{Г(СОУЭ)} = 0,953$ , время  $t_{пр} = 8,31$  [25, 26], величина  $t_{рч} = 1,0$  с. Тогда величина  $\tau_{нэ}$  составит 13,81 с. Далее рассчитывается время движения людей по ЭП с учетом принятых к расчету скоростных характеристик (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные характеристики движения персонала по эвакуационным путям, расположенным на площадке обслуживания ГПА

№ рабочего места	Время движения по ЭП от рабочего места до эвакуационного выхода, с
1	4,2
2	2,9
3	4,2
4	6

В качестве  $U_{э}$  рассматривалось случайное время выхода людей на эвакуационные пути с рабочих мест. Величины  $M_U$  и  $\sigma_U$  принимались по экспериментальным данным [29]. При выборке, равной 98 случаев выхода людей из пространства кожуха ГПА на ЭП, математическое ожидание  $M_U$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_U$  составили 10,16 и 4,23 с соответственно. При аналогичной выборке  $M_U$  и  $\sigma_U$  время спуска людей с площадки обслуживания пожарных извещателей составило 7,16 и 2,09 с соответственно. Полученные данные подставлялись в (3) относительно каждого эвакуационного пути:

$$b_{эп(1)} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[ \tau_{бл} - 4,2 + 13,81 \times \left( 1 + \frac{1,028}{5,23} \exp \left[ -\frac{(U_{э(1)} - 7,16)^2}{8,73} \right] \right) \right], \quad (8)$$

$$b_{эп(2)} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[ \tau_{бл} - 2,9 + 13,81 \times \left( 1 + \frac{1,028}{10,59} \exp \left[ -\frac{(U_{э(2)} - 10,16)^2}{2 \cdot 4,23^2} \right] \right) \right], \quad (9)$$

$$b_{эп(3)} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[ \tau_{бл} - 4,2 + 13,81 \times \left( 1 + \frac{1,028}{10,59} \exp \left[ -\frac{(U_{э(3)} - 10,16)^2}{2 \cdot 4,23^2} \right] \right) \right], \quad (10)$$

$$b_{эп(4)} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[ \tau_{бл} - 6,0 + 13,81 \times \left( 1 + \frac{1,028}{5,23} \exp \left[ -\frac{(U_{э(4)} - 7,16)^2}{8,73} \right] \right) \right]. \quad (11)$$

Время блокирования  $\tau_{бл}$  является переменной, относительно которой оценивался  $b_{эп}$  для каждого эвакуационного пути. Имитация  $U_{э(1)}$ ,  $U_{э(2)}$ ,  $U_{э(3)}$  и  $U_{э(4)}$  производилась с помощью датчика случайных чисел. Количество итераций составило 24 891 цикл (по правилу Чебышева) [21, 39–40]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Апробация модели (7) и метода построения сценария пожара проводилась на примере аварии газоперекачивающего агрегата. Диаграмма пожара на ГПА приведена на рис. 2. Для построения диаграммы пожара использовались информация из эксплуатационной документации, сведения по отказам, о предпосылках к инцидентам, мнение специалистов.

Расшифровка обозначений и сокращений, указанных на рис. 2, следующая:  $P_{Г}(t)$  – текущее давление газа, МПа;  $P_{Г(доп)}$  – допустимое давление газа, МПа;  $P_{М}(t)$  – текущее давление турбинного масла, МПа;  $P_{М(доп)}$  – допустимое давление масла, МПа;  $N_{об}(t)$  – текущее значение частоты вращения турбины газотурбинного двигателя (ГТД) об/мин;  $N_{об(доп)}$  – допустимое значение частоты вращения турбины ГПА об/мин;  $I(t)$  – текущее значение тока в электросети или электрооборудовании, А;  $I_{доп}$  – допустимое значение величины тока в электросети, электрооборудовании, А;  $K_{Г(авв)}$  – коэффициент готовности аварийно-вытяжной вентиляции (АВВ) цеха;  $K_{Г(сac)}$  – коэффициент готовности системы аварийного слива (САС) масла в подземную емкость;  $K_{Г(сау)}$  – коэффициент готовности системы автоматического управления (САУ);  $K_{Г(эс)}$  – коэффициент готовности системы безопасности энергоснабжения (СБЭ);  $K_{Г(эao)}$  – коэффициент готовности системы экстренного аварийного останова (ЭАО);  $Q_{Г}$  – вероятность возникновения события  $P_{Г}(t) > P_{Г(доп)}$ ;  $Q_{М}$  – вероятность возникновения события  $P_{М}(t) > P_{М(доп)}$ ;  $Q_{кз}$  – вероятность возникновения переходного сопротивления (короткого замыкания) в электрооборудовании.



Таблица 3

Результаты оценки  $b_{эп(1)}$ ,  $b_{эп(2)}$ ,  $b_{эп(3)}$ ,  $b_{эп(4)}$  с рабочих мест рис. 1

Рабочее место 1				Рабочее место 2			
$\tau_{бл}, с$	$b_{эп(1)} > 0$	$b_{эп(1)} \leq 0$	$P_{эп(1)}$	$\tau_{бл}, с$	$b_{эп(2)} > 0$	$b_{эп(2)} \leq 0$	$P_{эп(2)}$
23,90	24 982	0	0,999	22,00	24 982	0	0,999
23,30	24 242	740	0,970	21,70	17 558	7424	0,702
23,15	17 888	7094	0,716	21,65	8095	16 887	0,324
23,00	4470	20 512	0,178	21,62	60	24 922	0,002
22,80	0	24 982	0,000	21,6	0	24 982	0,000
Рабочее место 3				Рабочее место 4			
$\tau_{бл}, с$	$b_{эп(3)} > 0$	$b_{эп(3)} \leq 0$	$P_{эп(3)}$	$\tau_{бл}, с$	$b_{эп(4)} > 0$	$b_{эп(4)} \leq 0$	$P_{эп(4)}$
23,60	24 982	0	0,999	26,20	24 982	0	0,999
23,10	23 964	1018	0,959	25,08	21 810	3172	0,873
23,04	11 911	13 071	0,476	25,00	13 756	11 226	0,550
23,00	3176	21 806	0,127	24,90	4661	20 321	0,186
22,80	0	24 982	0,000	24,80	0	24 982	0,000

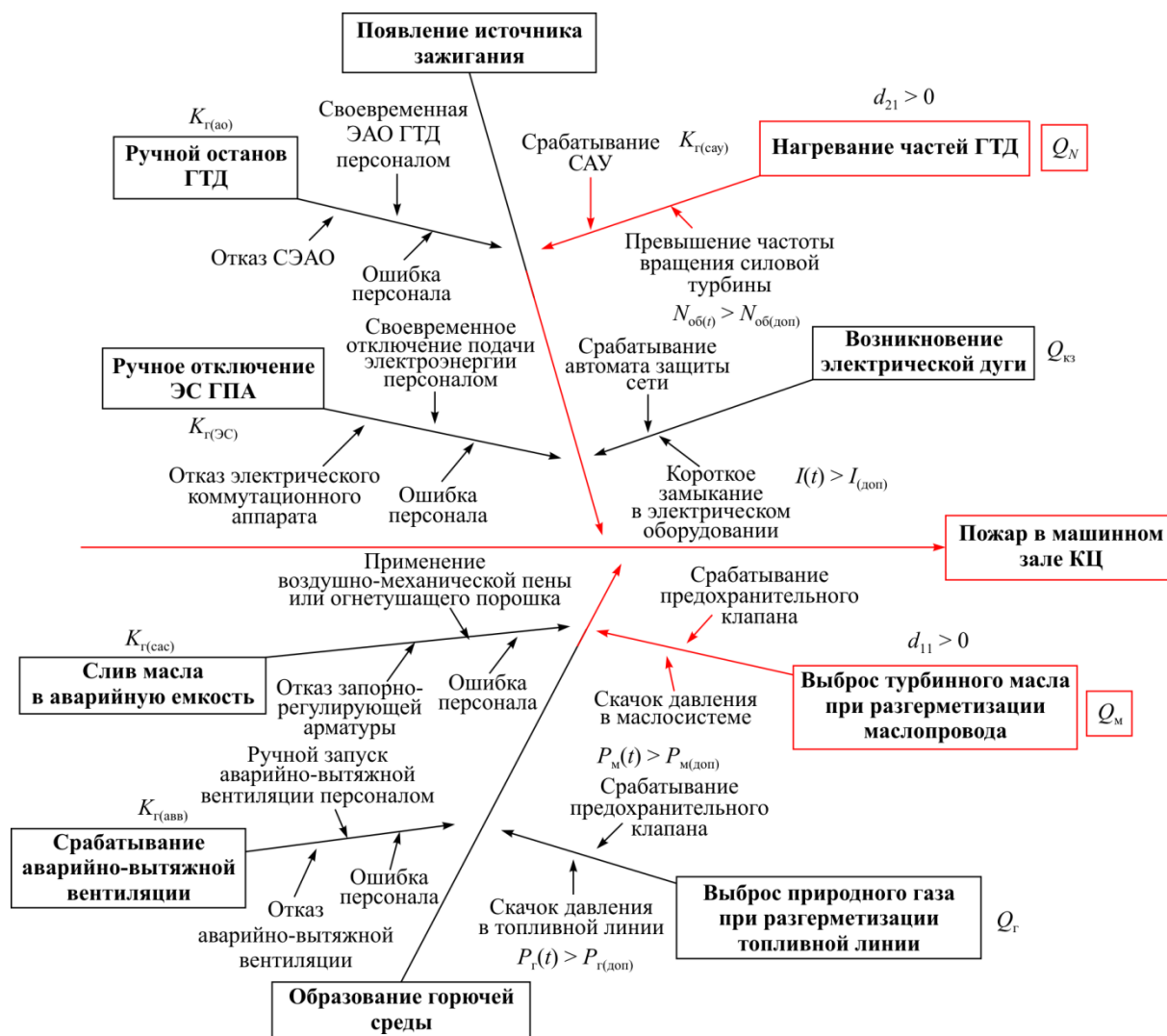


Рис. 2. Диаграмма пожара в машинном зале компрессорного цеха. Красными стрелками обозначен анализируемый сценарий пожара

Анализ диаграммы пожара позволяет заключить, что пожароопасная ситуация «образование горючей среды» в машинном зале цеха может реализоваться при выбросе из

коммуникаций природного газа и (или) турбинного масла. Причиной выброса в первом случае является скачок давления  $P_r(t) > P_{r(доп)}$  в газопроводе топливной линии. Это

описывается вероятностью  $Q_r$ . При моделировании события  $P_r(t) > P_{r(доп)}$  учитывалось влияние на развитие пожароопасной ситуации аварийно-вытяжной вентиляции и действий персонала, которые описываются коэффициентом  $K_{r(авв)}$ .

Аналогичным образом моделируется выброс масла и маслопровода. Скачок давления в маслосистеме  $P_m(t) > P_{m(доп)}$  вызван засорением масляных фильтров и отказом предохранительного клапана. Их отказы описываются вероятностью  $Q_m$ . Влияние защиты САС и действия персонала описываются коэффициентом готовности системы аварийного слива масла в подземную емкость  $K_{r(сac)}$ . Пожароопасная ситуация «появление источника зажигания» реализуется тогда, когда произойдет образование электрической дуги в результате короткого замыкания  $I(t) > I_{доп}$  в электрооборудовании. Причина возникновения события  $I(t) > I_{доп}$  связана с ухудшением свойств изоляции, несрабатыванием автомата защиты, которые описываются  $Q_{кз}$ . Неготовность системы безопасности энергоснабжения описывается коэффициентом готовности  $K_{r(эс)}$ . Второй источник зажигания может реализоваться в том случае, если частота вращения силовой турбины ГТД превысит предельно допустимое значение  $N_{об}(t) > N_{об(доп)}$  и САУ окажется неготовой к остановке ГТД по сигналу аварии, персонал совершит ошибку или система экстренного аварийного останова не выполнит требуемую функцию.

Для анализа выбран сценарий возникновения и развития пожара по ветви «выброс турбинного масла при разгерметизации маслопровода». По сценарию пожароопасная ситуация будет развиваться следующим образом: в результате засорения масляных фильтров произойдет нарастание давления масла в маслосистеме ГПА с последующим разрывом маслопровода на

входе в маслобак. Выброс масла произойдет на площади  $10 \text{ м}^2$ , в зоне которой находится промвал ГПА. Вследствие высокой частоты вращения силовой турбины область промвала нагрета до температуры самовоспламенения масла. Математическая модель сценария пожара (по стадиям) приведена ниже:

$$d_{11} = \frac{P_{m(доп)} - P_m(t) \left( 1 + \frac{1,0028}{\sigma_P \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(P_m(t) - M_P)^2}{2\sigma_P^2} \right] \right)}{P_{m(доп)}} \times Q_m (1 - K_{r(сac)}), \tag{12}$$

$$d_{21} = \frac{N_{об(доп)} - N_{об}(t) \left( 1 + \frac{1,0028}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(N_{об}(t) - M_N)^2}{2\sigma_N^2} \right] \right)}{N_{об(доп)}} \times (1 - K_{r(эс)})(1 - K_{r(ав)}). \tag{13}$$

Статистические испытания моделей (12), (13) показали реалистичность рассматриваемого сценария пожара, так как вероятность реализации стадий  $d_{11}$  и  $d_{12}$  превысила нулевое значение. Дерево событий сценария приведено на рис. 3.

### Заключение

Таким образом, рассмотрены новые подходы к оценке пожарной безопасности путей эвакуации, новый метод построения сценариев пожара. Получены формула показателя пожарной безопасности путей эвакуации, модель оценки вероятности эвакуации людей по эвакуационным путям, модель эвакуации людей из производственного помещения и модель возникновения и развития пожара. Приведены примеры апробации перечисленных моделей на конкретном производственном объекте.

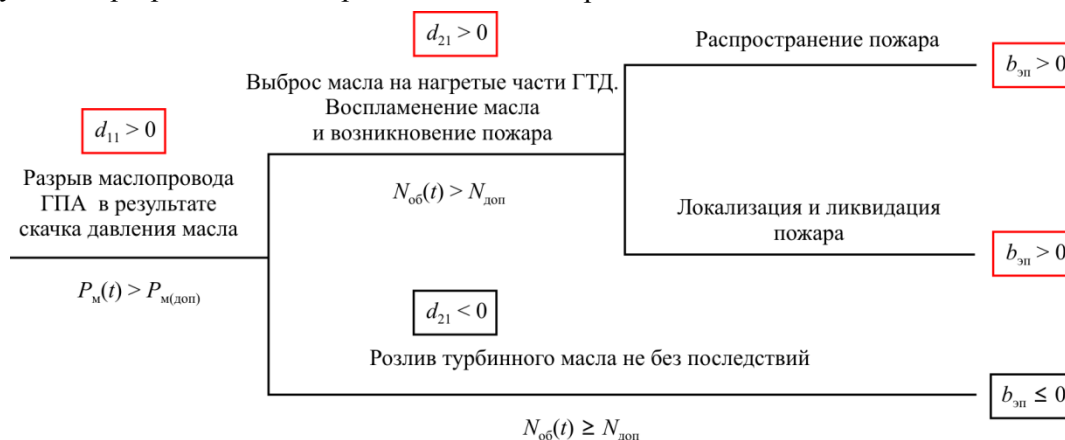


Рис. 3. Дерево событий сценария пожара, возникшего в результате воспламенения масла от нагретых частей ГТД



## Библиографический список

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: утв. Приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404: зарегистрировано в Минюсте России 17.08. 2009 г. № 14541 (в ред. Приказа МЧС России от 14.12.2010 г. № 649). – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_91229/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/) (дата обращения: 12.05.2018).
2. Эвакуация и поведение людей при пожаре: учеб. пособие / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин, А.П. Парфененко [и др.]. – М.: Академия МЧС ГПС России, 2015. – 262 с.
3. Кирилов А.Э., Трефилов В.А. Математическая модель оценки пожарной безопасности компрессорного цеха газотранспортного предприятия // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 9. – С. 38–45.
4. Кирилов А.Э., Черный К.А. Модель оценки пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений и зданий // Газовая промышленность. – 2018. – № 9 (774). – С. 120–124.
5. Исследование процесса эвакуации людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода / Ю.Н. Шебеко, Д.М. Гордиенко, В.П. Некрасов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 83–88.
6. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2017. – 357 с.
7. Wood P.G. The behaviour people in fires. *British Note*, 933. – 1972. – November. – 113 p.
8. Nilsson D., Johansson A. Social influence during the initial phase of a fire evacuation – Analysis of Evacuation experiments in a cinema theatre // *Fire Safety Journal*. – 2009. – Vol. 44, iss. 1. – P. 71–79. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.008
9. Bryan J.L. A phenomenon of human behaviour seen in selected high-rise buildings fire // *Fire Journal*. – 1985. – November. – P. 27–90.
10. Brennan P. Timing human response in real fires // *Fire Safety Science*. – 1997. – 5. – P. 807–818. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.5-807
11. Spearpoint M.J. The effect of pre-movement on evacuation times in a simulation model // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2003. – Vol. 14, № 1. – P. 33–53. DOI: 10.1177/1042391504034742
12. Белосохов И.Р. К проблеме формирования продолжительности времени начала эвакуации людей при пожаре // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – Вып. 2 (36). – С. 9.
13. Investigating the impact of culture on evacuation behaviour / E. Galea, S. Deere, G. Sharp, L. Filippidis, L. Hulse // *Proceedings of the 12-th International Fire Science & Engineering Conference, Interflam 2010, 5–7 July 2010, University of Nottingham*. – 2010. – Vol. 1. – P. 879–892.
14. Proulx G., Sime J.D. To prevent “panic” in an underground emergency: why not tell people the Truth? // *Proceedings Of The Third International Symposium On Fire Safety Science*. – 1991. – 3. – P. 843–852. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-843
15. Sime J. Escape behaviour in fires: panic or affiliation? PhD thesis, University of Surrey, 1984. – 321 p.
16. Jones B.K., Hewitt A. Leadership and group formation in high rise building evacuations // *Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science*. – New York: Hemisphere Publishing Corp., 1986. – P. 513–522. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.1-513.
17. Machado Tavares R., Gwynne S., Galea E.R. Collection and analysis of pre-evacuation time data collected from evacuation trials conducted in library facilities in Brazil // *Journal of Applied Fire Science*. – 2006–2007. – Vol. 15, № 1. – P. 23–40. DOI: 10.2190/AF.15.1.b
18. Boyce K.E. Egress capabilities of people with disabilities: PhD Thesis. – Belfast: University of Ulster, 1996. – 43 p.
19. Кирилов А.Э. Метод определения опасных ситуаций для персонала компрессорного цеха на этапе планирования оперативных действий при возникновении пожара // *Пожарная безопасность*. – 2017. – № 3. – С. 54–60.
20. Кирилов А.Э., Трефилов В.А. Инженерная оценка безопасности персонала при планировании оперативных действий по тушению пожара в производственных помещениях огнетушителями // *Безопасность труда в промышленности*. – 2017. – № 7. – С. 31–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-7-31-36
21. Кирилов А.Э., Дикарева М.Н. Оценка безопасности работников компрессорного цеха посредством статистических испытаний имитационной модели эвакуации // *Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства: материалы X Юбилейной междунар. научн.-практ. конф.* – Пермь, 2017. – С. 144–154.
22. Tadahisa J. Visibility and human behaviour in fire smoke // *The SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering*. 3 ed. Eds. DiNunno et al. NFPA, Quincy, MA, 2002. – P. (2-42)–(2-53).
23. Shields T.J., Boyce K.E., Silcock G.W.H. Towards the characterization of large retail stores // *Human Behaviour in Fire: Proceedings of the First International Symposium*. – Belfast: University of Ulster, 1998. – P. 277–290.
24. Bellamy L.L., Geyer T.A.W. Experimental programme to investigate informative fire warning characteristics for motivation fast evacuation. – Borehamwood, Fire Research Station, 1990.
25. Самошин Д.А. Применение концепции «человек – среда – пожар» для понимания поведения персонала торговых комплексов при пожаре: дис. ... д-ра философии / Инженерный факультет Ольстерского университета. – Ольстер, 2004.
26. Поведение персонала торговых комплексов при пожаре. Часть II. Действие в смоделированной ситуации «пожар в торговом комплексе» / Д. Шильдс, К.Е. Бойс, В.В. Холщевников, Д.А. Самошин // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2005. – Т. 14, № 3. – С. 47–58.
27. Bruck D. The who, what, where and why of waking to fire alarms: a review // *Fire Safety Journal*. – 2001. – Vol. 36, iss. 7. – P. 623–639. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00025-X
28. Справочник по инженерной психологии / С.В. Борисов, В.А. Денисов, Б.А. Душков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 368 с.
29. Кирилов А.Э. Оценка времени движения людей по участкам эвакуации повышенной сложности // *Безопасность и управление рисками*. – 2016. – № 5. – С. 34–41.

30. Трефилов В.А. Теоретические основы безопасности человека: курс лекций. – Пермь: Пермское кн. изд-во, 2006. – 100 с.

31. Трефилов В.А. Проблемы исследования безопасности в системах различного уровня // Научные исследования и инновации. – 2013. – Т.7, № 1–4. – С. 4–7.

32. Углекислота в системе пожаротушения впервые убила человека в России [Электронный ресурс] // РИА Новости. – 26.08.2010. – URL: <https://ria.ru/incidents/20100826/269270419.html> (дата обращения: 12.05.2018).

33. Калугин М.Н. Повышение надежности теплоснабжения зданий с помощью управления противоаварийной защитой котельных: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2015. – 111 с.

34. Калугин М.А., Трефилов В.А. Автоматизированная система состояния безопасности газовой котельной // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 3. – С. 59–61.

35. Костров А.Е. Автоматизированное управление безопасностью технологических трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2010. – 102 с.

36. 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.

37. Критерий прочности и расчет механической надежности конструкций / В.Н. Аликин, П.В. Анохин [и др.]. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 158 с.

38. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов [и др.]. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 368 с.

39. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.

40. Кирилов А.Э., Трефилов В.А. Разработка метода оценки безопасности персонала компрессорного цеха при эвакуации с использованием методов имитационного моделирования // Газовая промышленность. – 2017. – № 6 (753). – С. 18–22.

## References

1. Metodika opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh obektakh [Method of determining the calculated values of fire risk at production facilities]: Uтверждена Приказом МChS России от 10 July 2009 no.404, available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_91229/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/) (accessed 12 May 2018).

2. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P. et al. Evakuatsiya i povedenie lyudey pri pozhare [Evacuation and behavior of people in case of fire]. Moscow, Akademiya MChS GPS Rossii, 2015, 262 p.

3. Kirilov A.E., Trefilov V.A. Matematicheskaya model otsenki pozharnoy bezopasnosti kompressorного tsekha gazotransportного predpriyatiya [The mathematical model for fire safety assessment of compressor shop of gas transmission enterprise]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2016, no.9, pp.38-45.

4. Kirilov A.E., Chernyy K.A. Model otsenki pozharnoy bezopasnosti putey evakuatsii proizvodstvennykh pomeshcheniy i zdaniy [Fire Safety Assessment Model for the evacuation of industrial premises and buildings]. *Gazovaya promyshlennost*, 2018, no.9 (774), pp.120-124.

5. Shebeko Yu.N., Gordienko D.M., Nekrasov V.P. et al. Issledovanie protsessа evakuatsii lyudey pri pozhare s etazherki tekhnologicheskoy linii gazopererabatyvayushchego zavoda [Study of the process of evacuation of people in case of fire from a shelf of the technological line of a gas processing plant]. *Pozharnaya bezopasnost*, 2008, no.1, pp.83-88.

6. Samoshin D.A. Metodologicheskie osnovy normirovaniya bezopasnoy evakuatsii lyudey iz zdaniy pri pozhare [Methodological bases of rationing of safe evacuation of people from buildings in case of fire]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2017, 357 p.

7. Wood P.G. The behaviour people in fires. *British Note 933*, 1972, November, 113 p.

8. Nilsson D., Johansson A. Social influence during the initial phase of a fire evacuation – Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. *Fire Safety Journal*, 2009, vol.44, iss.1, pp.71-79. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.008

9. Bryan J.L. A phenomenon of human behaviour seen in selected high-rise buildings fire. *Fire Journal*, 1985, November, pp.27-90.

10. Brennan P. Timing human response in real fires. *Fire Safety Science*, 1997, 5, pp.807-818. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.5-807

11. Spearpoint M.J. The effect of pre-movement on evacuation times in a simulation model. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2003, vol.14, no.1, pp.33-53. DOI: 10.1177/1042391504034742

12. Belosokhov I.R. K probleme formirovaniya prodolzhitelnosti vremeni nachala evakuatsii lyudey pri pozhare [To the problem of the formation of the length of time to start evacuating people in case of fire]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2011, iss.2 (36), p.9.

13. Galea E., Deere S., Sharp G., Filippidis L., Hulse L. Investigating the impact of culture on evacuation behavior. *Proceedings of the 12-th International Fire Science & Engineering Conference, Interflam*, 2010, 5-7 July 2010, University of Nottingham, UK, vol.1, pp. 879-892.

14. Proulx G., Sime J.D. To prevent “panic” in an underground emergency: why not tell people The truth? *Proceedings Of The Third International Symposium On Fire Safety Science*, 1991, 3, pp.843-852. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-843

15. Sime J. Escape behaviour in fires: panic or affiliation? PhD thesis, University of Surrey, 1984, 321 p.

16. Jones B.K., Hewitt A. Leadership and group formation in high rise building evacuations. *Proceedings Of The First International Symposium on Fire Safety Science*. New York, Hemisphere Publishing Corp., 1986, pp.513-522. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.1-513

17. Machado Tavares R., Gwynne S., Galea E.R. Collection and analysis of pre-evacuation time data collected from evacuation trials conducted in library facilities in Brazil. *Journal of Applied Fire Science*, 2006-2007, vol.15, no.1, pp.23-40. DOI: 10.2190/AF.15.1.b

18. Boyce K.E. Egress capabilities of people with disabilities. PhD Thesis. Belfast, University of Ulster, 1996, 43 p.

19. Kirilov A.E. Metod opredeleniya opasnykh situatsiy dlya personala kompressornogo tsekha na etape planirovaniya operativnykh deystviy pri vozniknovenii pozhara [Method for determining hazardous situations for compressor shop personnel at the planning stage of operational actions in case of a fire]. *Pozharnaya bezopasnost*, 2017, no.3, pp.54-60.
20. Kirilov A.E., Trefilov V.A. Inzhenernaya otsenka bezopasnosti personala pri planirovanii operativnykh deystviy po tusheniyu pozhara v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh ognetyshitelnyami [Engineering safety assessment of personnel in the planning of operational activities to extinguish a fire in industrial premises with fire extinguishers]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2017, no.7, pp.31-36. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-7-31-36
21. Kirilov A.E., Dikareva M.N. Otsenka bezopasnosti rabotnikov kompressornogo tsekha posredstvom statisticheskikh ispytaniy imitatsionnoy modeli evakuatsii [Assesment of the safety of workers of the compressor shop through statistical tests of a simulation model of evacuation]. *Aktualnye problemy okhrany truda i bezopasnosti proizvodstva. Materialy X yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Perm, 2017, pp.144-154.
22. Tadahisa J. Visibility and human behaviour in fire smoke. *The SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering*. 3 ed. Eds. DiNenno et al. NFPA, Quincy, MA, 2002, pp.(2-42)-(2-53).
23. Shields T.J., Boyce K.E., Silcock G.W.H. Towards the characterization of large retail stores. *Human Behaviour in Fire. Proceedings of the First International Symposium*. Belfast, University of Ulster, 1998, pp.277-290.
24. Bellamy L.L., Geyer T.A.W. Experimental programme to investigate informative fire warning characteristics for motivation fast evacuation. Borehamwood, Fire Research Station, 1990.
25. Samoshin D.A. Primenenie kontseptsii "chelovek – sreda – pozhar" dlya ponimaniya povedeniya personala torgovykh kompleksov pri pozhare [The use of the concept "man – environment – fire" for understanding the behavior of the personnel of shopping complexes during a fire]. Doctor's degree dissertation. Olster, 2004.
26. Shilds D., Boys K.E., Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. Povedenie personala torgovykh kompleksov pri pozhare. Part II. Deystvie v smodelirovannoy situatsii "pozhar v torgovom komplekse" [The behavior of the staff of shop complexes in case of fire. Part II. Action in a simulated situation "fire in a shop complex"]. *Pozharovzryvbezopasnost*, 2005, vol.14, no.3, pp.47-58.
27. Bruck D. The who, what, where and why of waking to fire alarms: a review. *Fire Safety Journal*, 2001, vol.36, iss.7, pp.623-639. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00025-X
28. Borisov S.V., Denisov V.A., Dushkov B.A. et al. Spravochnik po inzhenernoy psikhologii [Handbook of engineering psychology]. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 368 p.
29. Kirilov A.E. Otsenka vremeni dvizheniya lyudey po uchastkam evakuatsii povyshennoy slozhnosti [Estimation of the time of movement of people in complex areas]. *Bezopasnost i upravlenie riskami*, 2016, no.5, pp.34-41.
30. Trefilov V.A. Teoreticheskie osnovy bezopasnosti cheloveka: kurs lektsiy [Theoretical foundations of human safety: a course of lectures]. Perm, Permskoe knizhnoe izdatelstvo, 2006, 100 p.
31. Trefilov V.A. Problemy issledovaniya bezopasnosti v sistemakh razlichnogo urovnya [Problems of safety research in systems of various levels]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2013, vol.7, no.1-4, pp.4-7.
32. Uglekisloty v sisteme pozharotusheniya v pervye ubila cheloveka v rossii [Carbon dioxide in the fire extinguishing system for the first time killed a man in Russia]. *RIA novosti*, 26.08.2010, available at: <https://ria.ru/incidents/20100826/269270419.html> (accessed 12 May 2018).
33. Kalugin M.N. Povyshenie nadezhnosti teplosnabzheniya zdaniy s pomoshchyu upravleniya protivovariynoy zashchitoy kotelnykh [Improving the reliability of heat supply to buildings by controlling the emergency protection of boiler rooms]. Ph. D. thesis. Tyumen, 2015, 111 p.
34. Kalugin M.A., Trefilov V.A. Avtomatizirovannaya sistema sostoyaniya bezopasnosti gazovoy kotelnoy [Automated security system for gas boiler room]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2014, no.3, pp.59-61.
35. Kostrov A.E. Avtomatizirovannoe upravlenie bezopasnostyu tekhnologicheskikh truboprovodov [Automated safety management of technological pipelines]. Ph. D. thesis. Perm, 2010, 102 p.
36. Kostrov A.E., Trefilov V.A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy upravleniya bezopasnostyu tekhnologicheskikh truboprovodov [Development of automated system to provide safety control over technological pipeline operation]. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2010, no.12, pp.74-77.
37. Alikin V.N., Anokhin P.V. et al. Kriteriy prochnosti i raschet mekhanicheskoy nadezhnosti konstruksiy [Strength criterion and calculation of the mechanical reliability of structures]. Perm, PSTU, 1999, 158 p.
38. Akimov V.A., Lapin V.L., Popov V.M. et al. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogenny risk [Reliability of technical systems and technological risk]. Moscow, Delovoy ekspress, 2002, 368 p.
39. Venttsel E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 575 p.
40. Kirilov A.E., Trefilov V.A. Razrabotka metoda otsenki bezopasnosti personala kompressornogo tsekha pri evakuatsii s ispolzovaniem metodov imitatsionnogo modelirovaniya [Development of a method for assessing the safety of the compressor shop personnel during evacuation using simulation methods]. *Gazovaya promyshlennost*, 2017, no.6 (753), pp.18-22.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кирилов А.Э., Черный К.А. Оценка пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.18, №2. – С.190–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.8

Please cite this article in English as:

Kirilov A.E., Chernyi K.A. Assessment of fire safety of evacuation routes in industrial premises. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.18, no.2, pp.190-200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.8