



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

КИРИЛОВ Альберт Эрнестович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ
ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ЭВАКУАЦИИ ПЕРСОНАЛА
ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

05.26.03 Пожарная и промышленная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент
Черный Константин Анатольевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, PhD, доцент,
действительный член национальной
академии наук пожарной безопасности
Самошин Дмитрий Александрович

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Академия Государственной
противопожарной службы МЧС России»,
начальник учебно-научного комплекса
пожарной безопасности объектов защиты

Доктор технических наук, профессор
Колодкин Владимир Михайлович

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования «Удмуртский
государственный университет»,
профессор кафедры общеинженерных
дисциплин Института гражданской
защиты

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы МЧС России»

Защита состоится «29» сентября 2021 г. в ___:___ часов на заседании
диссертационного совета У.05.26.03 федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус_, аудитория_).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru феде-
рального государственного автономного образовательного учреждения высшего об-
разования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.П. Бызов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Один из самых эффективных способов обеспечения пожарной безопасности персонала производственных объектов – это организация рабочих мест в производственных помещениях таким образом, чтобы исключалась возможность воздействия на персонал опасных факторов пожара (далее – ОФП) при его эвакуации. По данному условию оценивается пожарный риск, рассчитывается вероятность эвакуации персонала и при необходимости вносятся изменения в принципы организации рабочих мест в производственных помещениях.

Современный научно-методический аппарат, позволяющий оценивать вероятность эвакуации персонала из производственных помещений, подразумевает учет результатов исследований физических процессов, происходящих при пожаре, влияния токсичных продуктов горения на организм человека, поведения людей в условиях пожара, закономерностей движения людей в потоке. Большой вклад в данную научную работу внесли такие российские и зарубежные ученые, как В.В. Холщевников, А.А. Таранцев, И.С. Молчадский, М.Ю. Кошмаров, С.В. Пузач, Д. Шильдс, Д.А. Самошин, К. Бойс, Х. Фелькель, В.М. Колодкин, А.В. Матюшин, Ю.Н. Щебеко, А.Я. Корольченко, Д.Ф. Кожевин, С.А. Колодяжный, А.В. Смагин, Е.С. Абакумов, А.П. Парфененко, З.С.-А. Айбуев, Н.В. Ландышев, Н. Хай, О.С. Лебедченко, С.В. Субачев, Д.В. Шихалев, В.Ю. Процкий, Н. Громан и другие исследователи. Тем не менее остаются отдельные вопросы, не достаточным образом проработанные в действующих нормативных документах в области пожарной безопасности, на основании которых проводится оценка вероятности эвакуации персонала из производственных помещений, а именно:

- не учитываются особенности поведения людей, связанные с восприятием и оценкой ситуации на пожаре и с принятием каких-либо дальнейших действий;
- не учитывается фактическое расположение персонала на постоянных и временных рабочих местах в условиях сложной компоновки технологического оборудования, в ограниченных замкнутых пространствах, на высоте, в кабинках подъемных сооружений, на такелажных средствах и приспособлениях.

Указанные недостатки могут стать причиной недооценки пожарной опасности для персонала, трудовая занятость которого осуществляется на производственных объектах.

Таким образом, перечисленные недостаточно проработанные задачи научно-методического аппарата оценки вероятностей эвакуации людей обусловили необходимость проведения настоящего исследования.

Цель работы

Совершенствование модели оценки вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием для повышения пожарной безопасности работников производственных объектов.

Задачи исследования

1. Обосновать необходимость учета особенностей поведения людей при пожаре и фактического расположения рабочих мест при оценке вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием;
2. Разработать показатель, учитывающий фактическое расположение рабочих мест персонала, время блокирования путей эвакуации ОФП и особенности поведения людей при пожаре;
3. Усовершенствовать модель оценки вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием;
4. Предложить методику оценки пожарной безопасности рабочих мест, расположенных в производственных помещениях с технологическим оборудованием, провести ее апробацию на конкретном производственном объекте.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые разработан показатель пожарной безопасности путей эвакуации, позволяющий учитывать фактическое расположение рабочих мест персонала и особенности поведения людей при пожаре;
- на основе показателя пожарной безопасности усовершенствована модель оценки вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием;
- разработана методика оценки пожарной безопасности рабочих мест, расположенных в производственных помещениях с технологическим оборудованием.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в повышении пожарной безопасности работников производственных объектов путем применения научно-обоснованной методики оценки пожарной безопасности рабочих мест, расположенных в производственных помещениях с технологическим оборудованием:

- при разработке объемно-планировочных и конструктивных решений в ходе проектирования путей эвакуации из производственных помещений с технологическим оборудованием;
- при оценке потенциального пожарного риска;

- при разработке технических решений по защите производственных объектов установками пожарной автоматики, системами оповещения и управления эвакуацией;
- при организации временных и постоянных рабочих мест в производственных помещениях с технологическим оборудованием;
- при разработке локальных нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности (планы мероприятий по локализации и ликвидации аварий, инструкций о мерах пожарной безопасности и др.).

Методология и методы диссертационного исследования

В диссертационной работе использованы: основные научные положения теории вероятности и математической статистики, методология теории людских потоков, методы имитационного моделирования и статистических испытаний, методы планирования и проведения научного эксперимента, методы моделирования пожара при определении времени блокировании путей эвакуации ОФП.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показатель пожарной безопасности путей эвакуации, учитывающий случайное изменение времени эвакуации персонала, время блокирования путей эвакуации ОФП и особенности поведения людей при пожаре;
2. Усовершенствованная модель оценки вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием;
3. Методика оценки пожарной безопасности рабочих мест расположенных в производственных помещениях с технологическим оборудованием.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов исследования подтверждена: корректным применением положений теории вероятностей и математической статистики; статистически достоверными экспериментальными данными, полученными в ходе проведения экспериментов по учебной эвакуации людей на объектах нефтегазового комплекса; использованием нормативно установленных методов определения расчетного времени эвакуации персонала из производственных помещений.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы представлены на следующих конференциях: научно-техническая конференция молодых руководителей и специалистов «Новые пути и решения повышения эффективности и надежности работы газотранспортного предприятия» (г. Екатеринбург, 12–16 сентября 2011 г.); VI Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Современная газотранспортная отрасль: перспективы, проблемы, решения» (г. Томск, 17–18 апреля 2013 г.); II Международная научно-практическая конференция «Проблемы обеспе-

чения безопасности в промышленности, строительстве, на транспорте и в нефтегазовом деле» (г. Пермь, 24–25 октября 2013 г.); III Международная научно-практическая конференция «Безопасность и управление рисками» (г. Пермь, 9–11 ноября 2016 г.); X Юбилейная международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства – 2017: Теория и наилучшие практики риск-ориентированных подходов к системному управлению охраной труда и сохранению трудового потенциала» (г. Пермь, 14–15 ноября 2017 г.); XV Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная 30-й годовщине МЧС России (г. Иваново, 17–18 ноября 2020 г.).

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 научных работах, в том числе в семи научных статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, и в одном издании, входящем в международную базу цитирования SCOPUS.

Основные положения выносимые на защиту, полученные результаты, их анализ принадлежат автору. Все расчетные данные, указанные в диссертации выполнены автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 109 источников, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 107 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц и 18 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна, указаны положения, выносимые на защиту, обоснована теоретическая и практическая значимость работы и дана ее общая характеристика по главам.

В первой главе анализируется проблема обеспечения пожарной безопасности персонала на производственных объектах. Существующая модель оценки вероятности эвакуации людей из производственных помещений, которая применяется в «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утвержденной Приказом МЧС РФ № 404 от 10.07.2009 года (далее – нормативная методика) не позволяет учесть:

– особенности поведения людей, связанные с восприятием и оценкой ситуации на пожаре и с принятием каких-либо дальнейших действий (время реакции работников

на сигналы о пожаре, время принятия решения, продолжительность оперативных действий, которые персонал вынужден предпринимать при обнаружении пожара);

- фактическое расположение персонала на постоянных и временных рабочих местах в условиях сложной компоновки технологического оборудования, в ограниченных замкнутых пространствах, на высоте, в кабинках подъемных сооружений, на такелажных средствах и приспособлениях.

Таким образом, величина вероятности эвакуации персонала из производственных помещений, рассчитанная по используемой в противопожарном нормировании модели, может привести к некорректным результатам и в последующем к неточной оценке потенциального пожарного риска. Исходя из вышеизложенного, определена цель и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе подробно рассматривается ход решения поставленных задач исследования. Модель оценки вероятности эвакуации людей из производственных помещений нормативной методики описывается следующим выражением:

$$P_{\text{Э}} = 1 - (1 - P_{\text{ЭП}})(1 - P_{\text{ДВ}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{Э}}$ – вероятность эвакуации персонала и производственного помещения, $P_{\text{ДВ}}$ – вероятность выхода персонала через аварийные и иные выходы. Величина $P_{\text{ЭП}}$ находится по формуле:

$$P_{\text{ЭП}} = \begin{cases} \frac{0,8 \cdot \tau_{\text{бл}} - t_{\text{р}}}{\tau_{\text{нэ}}}, & \text{если } t_{\text{р}} < 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}} < t_{\text{р}} + \tau_{\text{нэ}} \\ 0,999, & \text{если } t_{\text{р}} + \tau_{\text{нэ}} \leq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}} \\ 0,001, & \text{если } t_{\text{р}} \geq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}} \end{cases}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ЭП}}$ – вероятность эвакуации персонала по эвакуационным путям, $\tau_{\text{бл}}$ – время блокирования эвакуационных путей ОП или их сопутствующими проявлениями, с; $t_{\text{р}}$ – расчетное время эвакуации персонала из производственного помещения, с; $\tau_{\text{нэ}}$ – время начала эвакуации персонала, с.

Модель (1) предлагается усовершенствовать и привести ее к следующему виду:

$$P_{\text{Э}i} = \begin{cases} 0,999, & \text{если все } b_{\text{ЭП}i} > 0, \\ 1 - \frac{N_{\text{ЭП}i}(b_{\text{ЭП}i} \leq 0)}{N_{\text{ЭП}}} \left(1 - \prod_{i=1}^n K_{\text{Г}i} \right), & \text{если хотя бы один } b_{\text{ЭП}i} \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{\text{Э}i}$ – вероятность эвакуации людей из i -го производственного помещения; $b_{\text{ЭП}}$ – показатель пожарной безопасности эвакуационных путей (при $b_{\text{ЭП}} \leq 0$ считается, что эвакуационный путь не обеспечит своевременную эвакуацию персонала, при $b_{\text{ЭП}} > 0$ считается, что эвакуационный путь обеспечит своевременную эвакуацию

персонала); $N_{эпi}$ ($b_{эп} \leq 0$) – количество эвакуационных путей в производственном помещении, которые не отвечают условию $b_{эп} > 0$; $N_{эпi}$ – количество всех эвакуационных путей в производственном помещении; $K_{гi}$ – коэффициент готовности i -й системы защиты, функциональным назначением которой является обеспечение безопасности людей при эвакуации (например, система дымоудаления, система аварийного освещения и др.). Коэффициент готовности $K_{гi}$ определяется по классическим методам теории надежности, при этом учитывается все аспекты технического обслуживания и ремонта указанных систем.

Анализ нормативных документов, научной литературы, статистических сведений, экспериментальных данных, научных разработок позволил определить многообразие факторов, влияющих на безопасность персонала при эвакуации (рисунок 1).

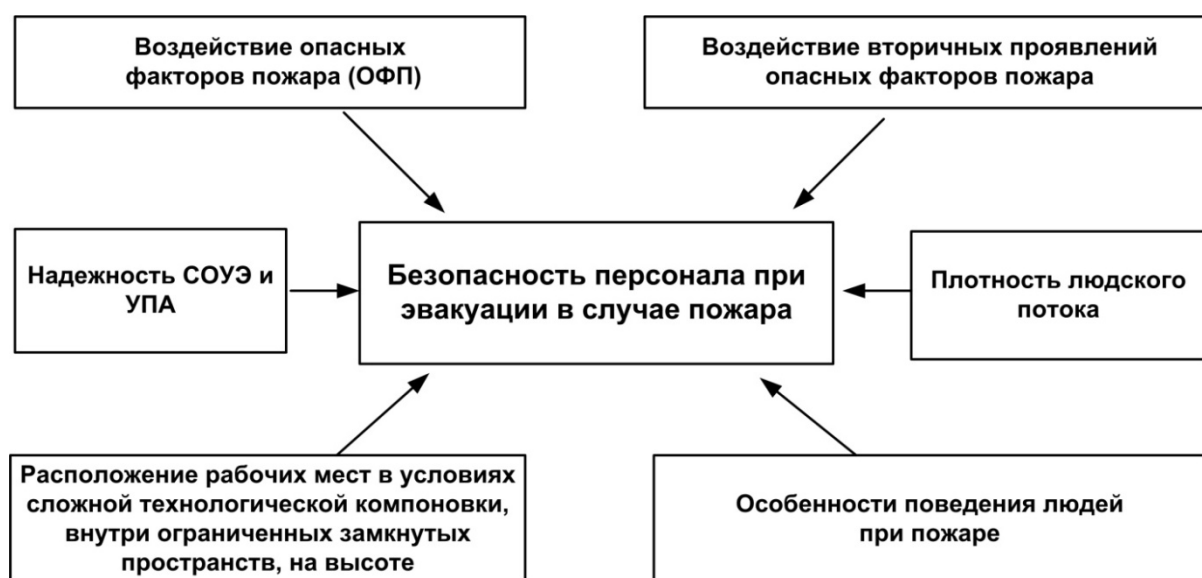


Рисунок 1 – Факторы и условия, влияющие на время эвакуации персонала:
ОФП – опасные факторы пожара; *СОУЭ* – система оповещения и управления эвакуацией;
УПА – установки пожарной автоматики

Это означает, что показатель или параметр, характеризующий безопасность персонала при эвакуации является случайной величиной и должен описываться вероятностным распределением.

Пусть $U_{э}$ – параметр случайного изменения времени эвакуации персонала вследствие влияния факторов, указанных на рисунке 1. Поскольку изменение $U_{эi}$ вызвано большим разнообразием факторов (размеры отсеков и люк-лазов, конструкции приспособлений для перемещения персонала, тип спецодежды, антропометрические характеристики людей, параметры систем защиты, воспринимаемые человеком опасные факторы пожара, должностные обязанности и др.), то считается, что вероятностное распределение $U_{э}$ подчиняется нормальному закону. Поскольку распределение $U_{эi}$ не может быть ни $+\infty$, ни $-\infty$, примем его усеченным. Тогда, ос-

новываясь на принципе сравнения времени блокирования путей эвакуации ОФП со временем эвакуации персонала, получим следующее выражение для оценки $b_{эпi}$:

$$b_{эпi} = \frac{1}{\tau_{бл}} \left[\tau_{бл} - t_{эi} \left(1 + \frac{C_U}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(U_{э} - M_U)^2}{2\sigma_U^2} \right] P_U \right) \right], \quad (4)$$

где $b_{эпi}$ – показатель пожарной безопасности i -го эвакуационного пути; C_U – коэффициент усечения нормального распределения параметра i -го события случайного изменения времени эвакуации людей $U_{эi}$; σ_U – среднеквадратичное отклонение $U_{эi}$, с; M_U – математическое ожидание $U_{эi}$, с; $t_{эi}$ – время эвакуации персонала из i -го производственного помещения, с; P_U – вероятность возникновения события случайного изменения времени эвакуации $U_{эi}$. Оценка $b_{эпi}$ осуществляется посредством статистических испытаний.

Величина $t_{эi}$ зависит от $\tau_{нэ}$ и времени движения работников по эвакуационным путям:

$$t_{эi} = \tau_{нэ} + t_{эпi}, \quad (5)$$

где $t_{эпi}$ – время движения персонала по i -му эвакуационному пути или расчетное время эвакуации t_{pi} при определении $t_{эп}$ расчетным путем.

Величина t_{pi} рассчитывается посредством моделей движения людей в потоке, которые используются в противопожарном нормировании. Если на производственном объекте имеются соответствующие условия, то величина $t_{эпi}$ определяется экспериментально при проведении учебной эвакуации.

Параметры C_U , σ_U , M_U и $U_{э}$ определяются исходя из специфики производственного объекта, а также особенностей организации и осуществления трудового процесса.

Вероятность P_U определяется по выражению $P_U = t_{рм} / t_{г}$, где $t_{рм}$ – время нахождения работника(ов) на рабочем месте в течение года, час; $t_{г}$ – количество рабочих часов за период равный календарному году.

Величина P_U при осуществлении персоналом оперативных действий перед эвакуацией приравнивается к единице, если указанные действия являются обязанностью работников 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 организациях для оценки профессиональных компетенций сотрудников. В данном случае принято допущение о том, что оперативные действия предпримут работники, имеющие высокую степень готовности к риску по результатам тестирования:

$$P_U = \frac{N_{p(b)}}{N_{\text{общ}}}, \quad (6)$$

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

Не исключен вариант случайного изменения времени эвакуации вследствие ошибочных действий персонала. Например, принятие решения о противодействии пожару первичными средствами пожаротушения в условиях неэффективности данных действий вследствие превышения значения ОФП критических для человека значений.

Чтобы учесть перечисленные и, возможно, другие ошибки работников объекта в формуле (4) множитель P_U может быть представлен в виде параметра надежности человека в процессе трудовой деятельности, который подробно описан в работах В.А. Острейковского.

Величина $\tau_{\text{бл}}$ рассчитывается посредством одной из трех классических моделей пожара: интегральной, зонной и полевой (дифференциальной). У каждой имеются условия применения. Учитывая эти условия, а именно конструктивные особенности помещения машинного зала, компоновку технологического оборудования, расположение рабочих мест, предлагается использовать двухзонную модель пожара.

Время начала эвакуации $\tau_{\text{нэ}}$ является параметром, который описывает особенности поведения людей при пожаре. В нормативной методике указано, что величина $\tau_{\text{нэ}}$ должна приниматься равной времени срабатывания СОУЭ с учетом ее инерционности. При отсутствии СОУЭ на объекте величину $\tau_{\text{нэ}}$ допускается принимать равной 0,5 минуты – для этажа, на котором возник пожар, и 2 минуты для вышележащих этажей. Если пожар возник в зальном помещении, где он может быть обнаружен одновременно всеми находящимися в помещении людьми, то $\tau_{\text{нэ}}$ допускается принимать равным нулю.

Указанный принцип определения $\tau_{\text{нэ}}$ имеет ряд недостатков. В частности экспериментально подтверждено, что люди, обнаружившие пожар по характерным признакам (дым, пламя, запах) или же по сигналам СОУЭ, не сразу начинают эвакуироваться, а оценивают обстановку и только после этого совершают действия эвакуационного характера.

Для исключения данного недостатка при оценке $P_{\text{э}}$ предложено рассчитывать величину $\tau_{\text{нэ}}$ для персонала производственных объектов по выражению:

$$\tau_{\text{нэ}} = t_{\text{соуэ}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{од}}, \quad \text{при } K_{\Gamma(\text{соуэ})} \geq 0,95, \quad (7)$$

где $t_{\text{соуэ}}$ – время срабатывания СОУЭ с учетом как собственной инерционности, так и инерционности УПА, у которой с СОУЭ имеется функциональная связь; $t_{\text{пр}}$ – про-

должительность реакции работника на сигналы тревоги от СОУЭ; $t_{пр}$ – время принятия решения работником о собственных дальнейших действиях после получения сигналов тревоги от СОУЭ; $t_{од}$ – длительность оперативных действий (отключение электрооборудования, принудительная остановка технологического процесса, аварийный сброс пожароопасных веществ в аварийные емкости, запуск автоматических установок пожаротушения, спасение пострадавших и другие оперативные действия); $K_{Г(соуэ)}$ – коэффициент готовности СОУЭ. Параметр $t_{соуэ}$ определяется в ходе эксплуатационных испытаний СОУЭ и УПА или же по технической документации (проект, паспорта технических средств и т.п.). Все слагаемые формулы (7) измеряются в секундах или минутах в зависимости от условий расчета.

В настоящее время достоверные сведения о $t_{пр}$ для различных категорий работников, занятых в производственной сфере, отсутствуют. Однако в отношении служащих крупных торговых центров подобные научные исследования проводились в Великобритании, что можно принять в качестве «отправной точки» при расчете $\tau_{нэ}$. В зависимости от типа сигнала о пожаре значения $t_{пр}$ указаны в Таблице 1.

Значение $t_{пр}$ для работников производственных объектов предлагается вычислять посредством компьютерных психодиагностических комплексов, которые используются для определения профессиональной пригодности работников.

Если в организации отсутствуют компьютерные средства психодиагностики, то могут быть использованы справочные данные из инженерной психологии.

Таблица 1 – Статистические сведения времени принятия решения для каждого типа сигнала о пожаре

Статистические характеристики распределения времени принятия решения	Значение, с		
	сигнализация	пламя	дым
Среднее значение	8,31	8,17	11,67
Нижняя и верхняя границы доверительного интервала (95%)	5,12 – 11,50	6,77 – 9,57	7,93 – 15,40
Медиана	4,35	5,75	6,90
Среднеквадратичное отклонение	10,23	5,69	14,57
Минимальные значения	0,90	0,70	0,40
Максимальные значения	52,90	23,8	62,00

Величина $K_{Г(соуэ)}$ вычисляется аналогично $K_{Гi}$. Следует отдельно пояснить принцип расчета $\tau_{нэ}$ при различных значениях $K_{Г(соуэ)}$. Если $K_{Г(соуэ)} \geq 0,95$, то это свидетельствует о том, что СОУЭ имеет высокий уровень надежности и обеспечит функцию оповещения людей в случае возникновения пожара. Если $K_{Г(соуэ)} < 0,95$, то считается, что СОУЭ недостаточно надежна для выполнения функции оповещения о пожаре. Такой случай возможен, и его также следует учитывать при оценке пожар-

ной безопасности путей эвакуации. Предлагается воспользоваться нормативной методикой для случая отсутствия на объекте СОУЭ.

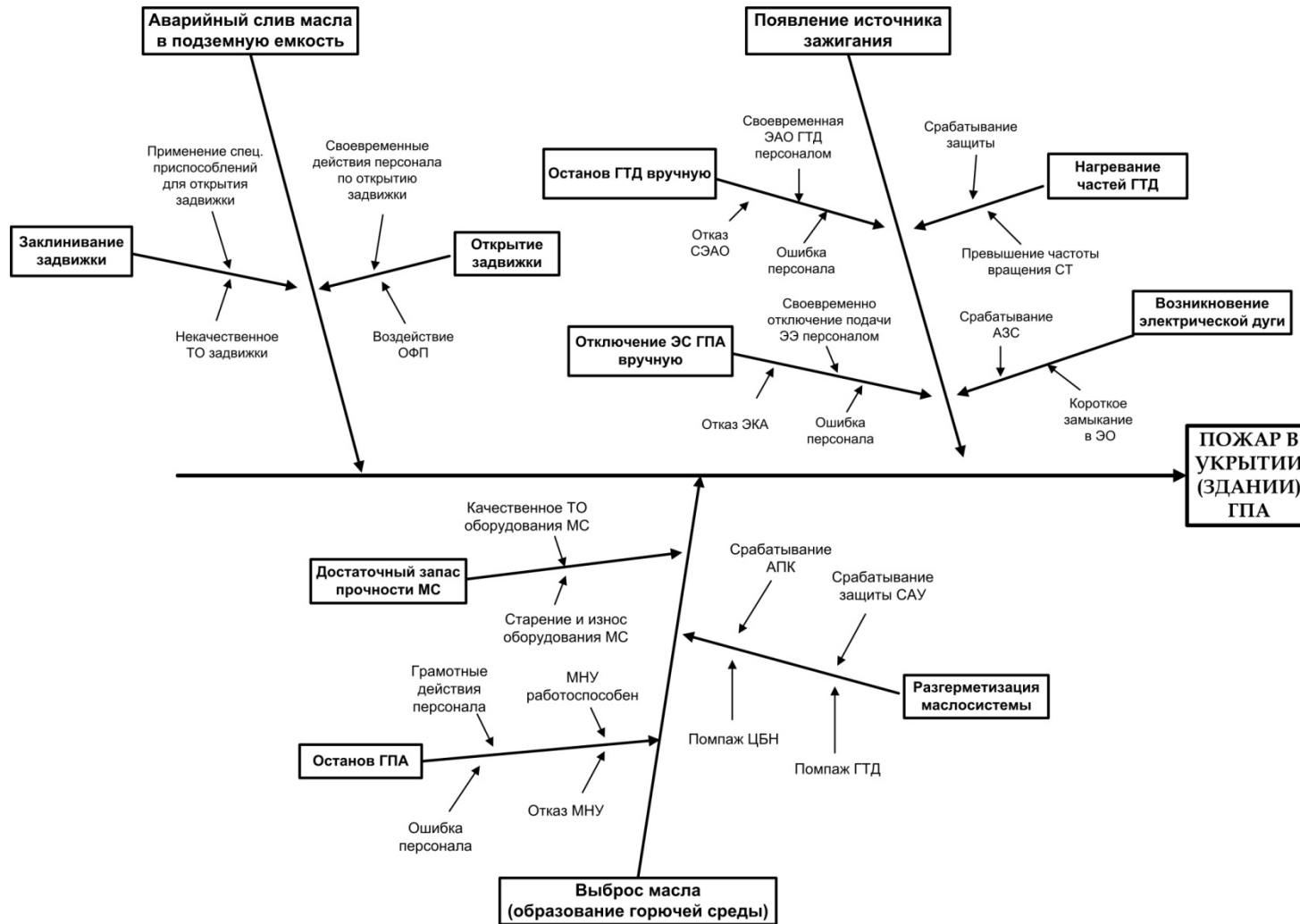


Рисунок 2 – Диаграмма сценария пожара, возникшего после помпажа нагнетателя или газотурбинного двигателя:
 АПК – антипомпажный клапан; САУ – система автоматического управления; ГТД – газотурбинный двигатель;
 ЦБН – центробежный нагнетатель; МНУ – масляный насос уплотнения; ТО – техническое обслуживание;
 ЭО – электрооборудование; ЭКА – электрокоммутационная аппаратура; СЭАО – система экстренного аварийного останова;
 ЭЭ – электрическая энергия; АЗС – автомат защиты сети; ЭАО – экстренный аварийный останов; СТ – силовая турбина

В третьей главе описываются ход и результаты апробации выполненных научных разработок на реальном производственном объекте. Апробация включала в себя следующие этапы: 1) построение сценария возникновения пожара и определение величины $\tau_{\text{бл}}$; 2) проведение эксперимента по учебной эвакуации персонала с целью определения параметров, необходимых для применения научных разработок; 4) определение проектной эвакуационной ситуации; 5) оценка пожарной безопасности эвакуационных путей и вероятности эвакуации персонала с использованием научных разработок; 6) оценка вероятности эвакуации персонала цеха с помощью нормативной методики; 7) анализ полученных результатов.

В качестве проектного сценария пожара выбрана ситуация выброса турбинного масла из маслосистемы ГПА с последующим его возгоранием вследствие выхода агрегата в помпажный режим работы. Данная ситуация является наиболее опасной для технологического процесса компримирования природного газа. Диаграмма сценария развития пожара рассматриваемой аварии представлена на Рисунке 2.

Расчет $\tau_{\text{бл}}$ осуществлялся на основе двухзонной модели пожара с применением специализированного для данных задач программного обеспечения. График динамики ОФП представлен на Рисунке 3.

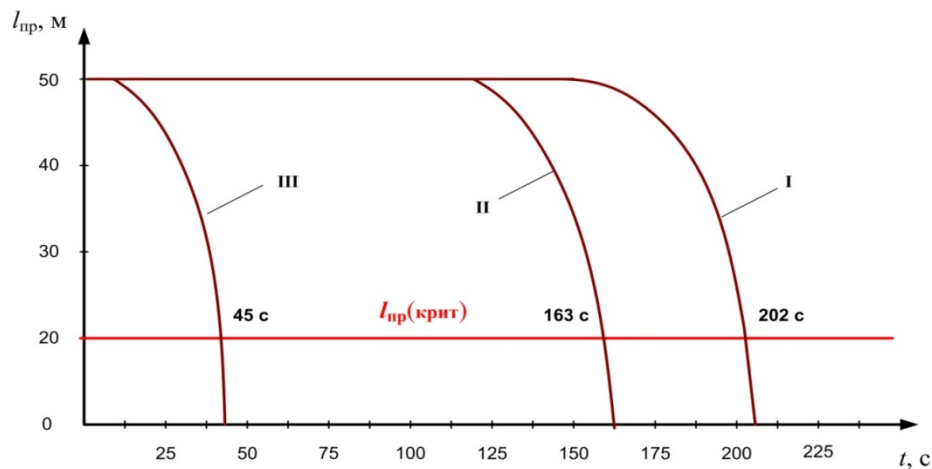


Рисунок 3 – График динамики ОФП «Снижение видимости в дыму»: I – при горении резинотехнических изделий; II – при горении электрических кабелей марки АВВГ, полиэтилена, ПВХ-оболочки; III – при горении турбинного масла ТП-22; $l_{\text{пр}}$ – предельное значение видимости в дыму

Экспериментальная учебная эвакуация в компрессорном цехе ООО «Газпром трансгаз Чайковский» проводилась с целью определения статистических характеристик, необходимых для применения показателя пожарной безопасности (4) и модели оценки вероятности эвакуации (3). Результаты эксперимента приведены в Таблице 2, фотография рабочих мест представлена на Рисунке 4. С этой же целью использовались результаты эксперимента по учебной

Таблица 2 – Статистические показатели времени выхода из отсеков ГПА, спуска с площадки обслуживания крановых путей и пожарных извещателей при получении сигнала «Тревога»

Показатель	Выход из отсеков ГПА	Спуск с площадки обслуживания по вертикальной лестнице
Выборка	142	138
M_U, c	10,16	7,16
σ_U, c	4,23	2,09

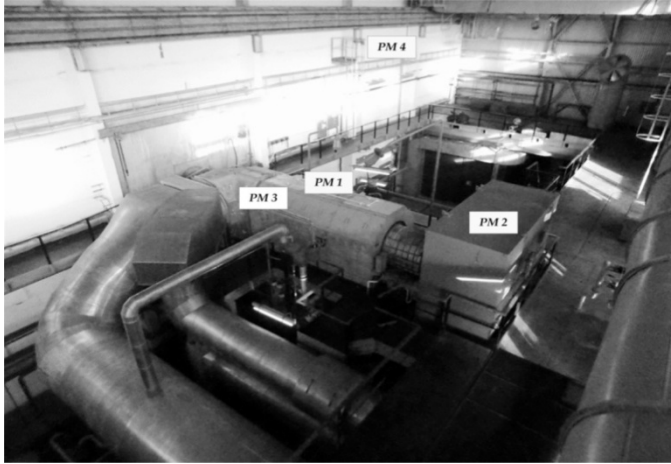


Рисунок 4 – Общий вид машинного зала газоперекачивающих агрегатов (ГПА): РМ 1 – рабочие места в отсеках правой стороны ГПА; РМ 2 – рабочие места в воздушозаборной камере (ВЗК); РМ 3 – рабочие места в отсеках левой стороны ГПА; РМ 4 – рабочие места на площадке обслуживания пожарных извещателей и кранового пути

эвакуации с технологической этажерки, описанные Шебеко Ю.Н., которая позволила определить статистические данные времени движения персонала по горизонтальным путям эвакуации, а также по вертикальным и наклонным лестницам.

В качестве проектной принята ситуация, в которой персонал цеха эвакуируется из помещения машинного зала. При этом истоками людских потоков являлись рабочие места, расположенные в отсеках ГТД, на площадке обслуживания крановых путей и пожарных извещателей. Расчетная схема эвакуации приведена на Рисунке 5.

В итоге показатели оценки пожарной безопасности путей эвакуации в соответствии с формулой (4) примут вид:

$$b_{\text{эл1}} = 0,278 \left[26,6 \left(1 + 0,023 \exp \left[-\frac{(U_{\text{эл1}} - 10,16)^2}{35,785} \right] \right) \right], \quad (8)$$

$$b_{\text{эл2}} = 0,278 \left[7,8 \left(1 + 0,023 \exp \left[-\frac{(U_{\text{эл2}} - 10,16)^2}{35,785} \right] \right) \right], \quad (9)$$

$$b_{\text{эл3}} = 0,278 \left[27,7 \left(1 + 0,023 \exp \left[-\frac{(U_{\text{эл3}} - 10,16)^2}{35,785} \right] \right) \right], \quad (10)$$

$$b_{\text{эл4}} = 0,278 \left[29 \left(1 + 0,06 \exp \left[-\frac{(U_{\text{эл4}} - 7,16)^2}{8,736} \right] \right) \right]. \quad (11)$$

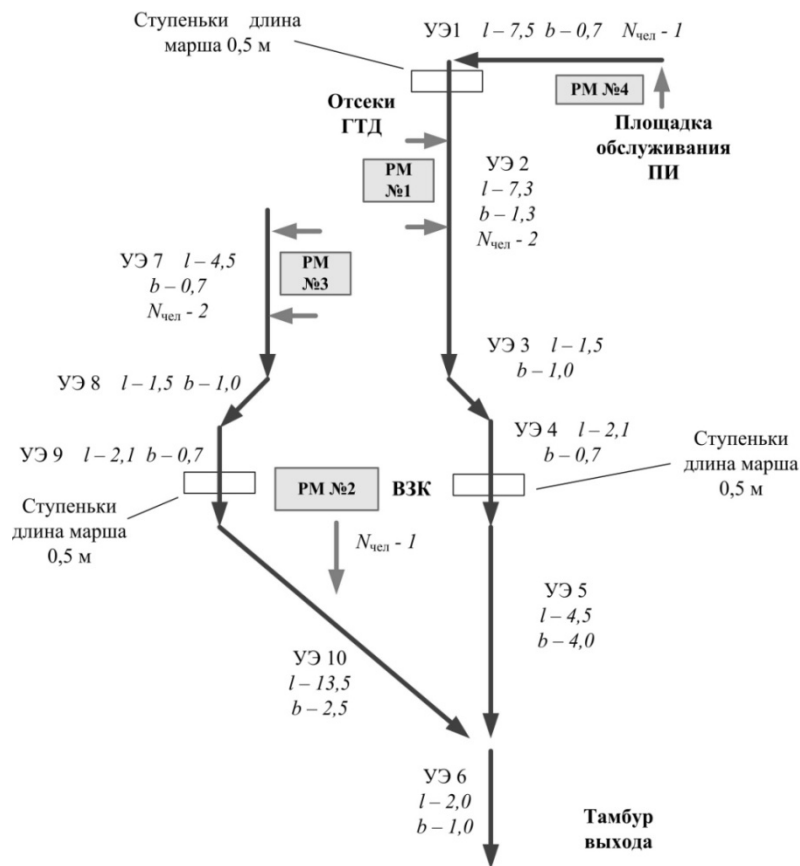


Рисунок 5 – Расчетная схема эвакуации с РМ персонала компрессорного цеха: РМ 1 – отсек ГПА с правой стороны; РМ 2 – отсек ГПА (ВЗК – воздухозаборная камера); РМ 3 – отсек ГПА с правой стороны; РМ 4 – на площадке обслуживания крановых путей и пожарных извещателей (ПИ), УЭ 1...УЭ 10 – участки эвакуации № 1–10

В выражениях (8) – (11), $b_{эп1}$, $b_{эп2}$, $b_{эп3}$, $b_{эп4}$ – показатели пожарной безопасности путей эвакуации от РМ 1, РМ 2, РМ 3 и РМ 4 соответственно; $U_{э1}$, $U_{э2}$, $U_{э3}$, $U_{э4}$ – параметры случайного изменения времени движения работников по эвакуационным путям от РМ 1, РМ 2, РМ 3 и РМ 4. Нормирование итерационных циклов при статистических испытаниях моделей (8) – (11) производилось по правилу Чебышева. Результаты имитационного моделирования приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты статистических испытаний моделей (3), (8) – (11) при моделировании эвакуационной ситуации

РМ 1	РМ 2	РМ 3	РМ 4
$b_{эп1} \leq 0$	$b_{эп2} \leq 0$	$b_{эп3} \leq 0$	$b_{эп4} \leq 0$
92	13124	264	0
$N_{эп} (b_{эп} \leq 0) = 92 + 13124 + 264 + 0 = 13480$, $N_{эп} = 24921 \cdot 4 = 99684$ $P_{э} = 1 - \frac{13480}{99684} \cdot 0,987 = 0,867$ $Q_{офп} = 1 - P_{эп} = 0,133$			

Результаты статистических испытаний моделей (8) – (11) показали, что при аварии маслосистемы и возникшем вследствие этого пожаре персонал, занятый обслуживанием ГТД, с вероятностью 0,867 эвакуируется успешно.

Рассмотренная проектная эвакуационная ситуация была так же смоделирована с помощью аппарата нормативной методики. Результаты моделирования приведены в Таблице 4. В соответствии с расчетами

скопление людей на участках слияния людских потоков не происходило. Поэтому время задержки равно нулю. Тогда, исходя из полученных данных, $P_{ЭП} = 0,999$, так как выполнилось условие $t_p + \tau_{нэ} < 0,8 \tau_{бл}$, т.е. $19,5 < 36$. Отсюда $P_{Э} = 1 - (1 - 0,999) \cdot (1 - 0,03) = 0,999$ и $Q_d = (1 - 0,999) \cdot (1 - 0,999) = 1,0 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 4 – Результаты моделирования проектной эвакуационной ситуации с помощью нормативной методики

Время, с	Номер эвакуационного пути (ЭП)	Номер участка эвакуации	Расстояние до эвакуационного выхода, м	Время, с	Номер эвакуационного пути (ЭП)	Номер участка эвакуации	Расстояние до эвакуационного выхода, м
0,0	ЭП № 1	Начальный участок	23,6	0,0	ЭП № 3	Начальный участок	17,4
2,7		7	19,1	4,4		2	10,1
3,6		8	17,6	5,3		3	8,6
4,9		9	15,5	6,5		4	6,5
5,4		9 (лестница)	15,0	7,0		4 (лестница)	6,0
13,5		10	2,0	9,4		5	2,0
14,7		6	0	10,6		6	0
$14,7 + \tau_{нэ} = 18,8$		Выход	–	$10,6 + \tau_{нэ} = 14,7$		Выход	–
4,0	ЭП № 2	Начальный участок	8,7	0,0	ЭП № 4	Начальный участок	25,4
4,0		10	2,0	4,5		1	17,9
5,2		6	0	8,9		2	10,6
$5,2 + \tau_{нэ} = 9,3$		Выход	–	9,8		3	9,1
			11,0	4		7,0	
			11,5	4 (лестница)		6,5	
			14,2	5		2,0	
			15,4	6		0	
			$15,4 + \tau_{нэ} = 19,5$	Выход		–	

Из полученных данных следует, что величина $P_{Э}$, рассчитанная с использованием нормативной методики, показывает высокую вероятность эвакуации персонала, а именно 0,999. При этом вероятность поражения от ОФП равна миллионной доле. Совершенно иначе выглядит результат оценки вероятности эвакуации персонала из помещения машинного зала, осуществленный с помощью моделей (8) – (11) и (3), где величины $P_{Э}$ и Q_d равны 0,867 и 0,133 соответственно. Такое различие, во-первых, связано с тем, что в методике не учитываются психологические аспекты поведения людей при пожаре, которые характеризуются временем начала эвакуации.

Во-вторых, методика не содержит параметра, отвечающего за движения людей в условиях плотной технологической компоновки, а в случае с персона-

лом КЦ – это движение внутри отсеков газотурбинного двигателя, спуск с площадки обслуживания крановых путей и пожарных извещателей.

Описанные различия между величинами $P_{\text{Э}}$ наблюдаются при моделировании динамики $\tau_{\text{бл}}$ (Таблица 5). В частности, в столбце 2 Таблицы 5 приведено непрерывное изменение $P_{\text{Э}}$ при варьировании $\tau_{\text{бл}}$, что более адекватно описывает исследуемый процесс, чем ряд значений $P_{\text{Э}}$ в третьем столбце Таблицы 5, где наблюдается скачкообразное изменение вероятности на 20-й и 25-й секундах. Такое скачкообразное изменение противоречит реальной картине процесса эвакуации людей и не может быть применено в задачах противопожарного нормирования.

Таблица 5 – Моделирование процесса $P_{\text{Э}} = f(\tau_{\text{бл}})$ с помощью усовершенствованной модели (3) и нормативной модели (1)

Время блокирования путей эвакуации ОФП, $\tau_{\text{бл}}$, с	Вероятность эвакуации $P_{\text{Э}}$, рассчитанная согласно (8)–(11) и (3)	Вероятность эвакуации $P_{\text{Э}}$, рассчитанная по нормативной методике	Время блокирования путей эвакуации ОФП $\tau_{\text{бл}}$, с	Вероятность эвакуации $P_{\text{Э}}$, рассчитанная согласно (8)–(11) и (3)	Вероятность эвакуации $P_{\text{Э}}$, рассчитанная по нормативной методике
18	0,015	0,000	25	0,465	0,999
19	0,052	0,000	26	0,504	0,999
20	0,140	0,155	27	0,541	0,999
21	0,224	0,348	28	0,572	0,999
22	0,300	0,542	29	0,597	0,999
23	0,364	0,735	30	0,618	0,999
24	0,419	0,928			

В четвертой главе рассматривается практическое использование научных разработок в виде применения методики оценки пожарной безопасности временных и постоянных рабочих мест, организованных в производственных помещениях с технологическим оборудованием. На первом этапе описывается процедура сбора предварительных сведений. На втором этапе рассматривается процедура построения сценариев возникновения и развития пожара. На третьем этапе описываются мероприятия, необходимые для построения проектной эвакуационной ситуации в случае пожара. На четвертом этапе излагается процедура непосредственной оценки пожарной безопасности рабочих мест, расположенных в производственных помещениях. И на заключительном, пятом этапе, приводятся рекомендации по повышению пожарной безопасности рабочих мест в случае получения негативного прогноза по результатам их оценки на основе представленной методики.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен анализ нормативных документов, научной литературы, статистических сведений, экспериментальных данных, научных разработок с целью

выявления факторов, оказывающих влияние на продолжительность эвакуации персонала производственного объекта при пожаре. Показано, что воздействие ОФП, особенности поведения людей при пожаре, надежность систем противопожарной защиты, плотность людских потоков, расположение рабочих мест в условиях плотной технологической компоновки, внутри ограниченных замкнутых пространств и на высоте способны оказать значительное влияние на продолжительность эвакуации персонала. Действующие нормативные документы в области пожарной безопасности не в полной мере учитывают ряд из перечисленных факторов и условий. В связи с этим обоснована необходимость учета случайного изменения времени эвакуации персонала, фактического расположения рабочих мест в производственном помещении, особенностей поведения людей при пожаре при оценке вероятности их эвакуации из производственных помещений с технологическим оборудованием.

2. Использован альтернативный метод построения сценариев пожара, в основу которого положена «Диаграмма Исикавы». Диаграмма позволяет учитывать все возможные факторы, способствующие возникновению источников пожарной опасности и причинно-следственные связи, приводящие к возникновению пожара.

3. Разработан показатель безопасности, характеризующий пожарную безопасность эвакуационного пути относительно ОФП. Показателем учитываются особенности поведения людей в виде таких параметров, как время принятия решения и время реакции на сигналы о пожаре. Кроме того, в показателе учитывается движение персонала к путям эвакуации в условиях плотной технологической компоновки производственного помещения.

4. На основе показателя пожарной безопасности усовершенствована модель оценки вероятности эвакуации персонала из производственных помещений с технологическим оборудованием, в основу которой положен статистический метод расчета вероятности на основе результатов имитационного моделирования процесса эвакуации.

5. Разработана методика оценки пожарной безопасности рабочих мест, расположенных в производственных помещениях с технологическим оборудованием, в основу которой легли вышеобозначенные научные разработки.

6. Научные разработки, а именно метод построения сценариев возникновения пожара, показатель пожарной безопасности путей эвакуации, усовершенствованная модель оценки вероятности эвакуации персонала из производственного помещения при пожаре, апробированы и внедрены в производственную деятельность Бардымского линейного производственного управления магистральных газопроводов и ООО «Газпром трансгаз Чайковский».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Кирилов, А.Э.** К вопросу об оценке пожарной безопасности рабочих мест персонала компрессорных цехов газотранспортных предприятий / А.Э. Кирилов, К.А. Черный // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 8. – С. 37–47. (*Научная специальность – 05.26.03*).
2. **Кирилов, А.Э.** Новые подходы в оценке пожарной безопасности персонала при его эвакуации из производственных помещений / А.Э. Кирилов, К.А. Черный // Безопасность в техносфере. – 2018. – Том 7, № 3. – С. 52–61. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).
3. **Кирилов, А.Э.** Оценка пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений / А.Э. Кирилов, К.А. Черный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 190–200. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).
4. **Кирилов, А.Э.** Метод определения опасных ситуаций для персонала компрессорного цеха на этапе планирования оперативных действий при возникновении пожара / А.Э. Кирилов // Пожарная безопасность. – 2017. – № 3. – С. 54–60. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).
5. **Кирилов, А.Э.** Инженерная оценка безопасности персонала при планировании оперативных действий по тушению пожара в производственных помещениях огнетушителями / А.Э. Кирилов, В.А. Трефилов // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 7. – С. 31–36. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).
6. **Кирилов, А.Э.** Математическая модель оценки пожарной безопасности компрессорного цеха газотранспортного предприятия / А.Э. Кирилов, В.А. Трефилов // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 9. – С. 38–45. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).
7. **Кирилов, А.Э.** К проблеме оценки времени начала эвакуации людей на производственных объектах. Предложение по ее решению на примере компрессорного цеха / А.Э. Кирилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 19. – С. 193–200. (*Группа научных специальностей издания – 05.26.00*).

Публикации в иных рецензируемых изданиях, сборниках материалов конференций:

8. **Кирилов, А.Э.** Модель оценки пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений и зданий / А.Э. Кирилов, К.А. Черный // Газовая промышленность. – 2018. – № 9 (774). – С. 120–124. (*Издание включено в Перечень ВАК*).
9. **Кирилов, А.Э.** Разработка метода оценки безопасности персонала компрессорного цеха при эвакуации с использованием методов имитационного моделирования / А.Э. Кирилов, В.А. Трефилов // Газовая промышленность. – 2017. – № 6 (753). – С. 106–110. (*Издание включено в Перечень ВАК*).
10. **Кирилов, А.Э.** Оценка вероятности эвакуации персонала из машинного зала компрессорного цеха / А.Э. Кирилов, К.А. Черный // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, посвя-

щенной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 17–18 ноября 2020 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 48–52.

11. **Кирилов, А.Э.** Разработка метода оценки безопасности персонала компрессорного цеха при планировании оперативных действий по тушению пожара / А.Э. Кирилов // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т.5, № 2. – С. 17–23.

12. **Кирилов, А.Э.** Оценка безопасности работников компрессорного цеха посредством статистических испытаний имитационной модели эвакуации / А.Э. Кирилов, М.Н. Дикарева // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства: материалы X Юбилейной международной научно-практической конференции – Пермь, 2017. – С. 144–154.

13. **Кирилов, А.Э.** Оценка времени движения людей по участкам эвакуации повышенной сложности / А.Э. Кирилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2016. – № 5. – С. 34–41.

14. **Кирилов, А.Э.** Подходы к разработке метода оценки безопасности персонала производственных объектов при планировании оперативных действий по тушению пожара / А.Э. Кирилов, М.Н. Дикарева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2016. – № 5. – С. 42–53.

15. **Кирилов, А.Э.** Метод определения времени начала эвакуации персонала компрессорного цеха, находящегося на площадках обслуживания газоперекачивающих агрегатов при возникновении пожара / А.Э. Кирилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2015. – № 3. – С. 25–42.

16. **Кирилов, А.Э.** Проверка выполнения требований пожарной безопасности газоперекачивающего агрегата / А.Э. Кирилов, В.А. Трефилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2015. – № 2. – С. 54–60.

17. **Кирилов, А.Э.** Модель развития пожароопасной ситуации на компрессорном цехе при отказе системы уплотнения газоперекачивающего агрегата / А.Э. Кирилов // Научные исследования инновации. – 2013. – Т. 7, № 1–4. – С. 171–176.

18. **Кирилов, А.Э.** Новый метод анализа системы обеспечения пожарной безопасности газотранспортного предприятия / А.Э. Кирилов // Современная газотранспортная отрасль: перспективы, проблемы, решения: материалы IV Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Томск, 2013. – Т II. – С. 109–112.