

*На правах рукописи*



**Гудин Сергей Витальевич**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ  
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ  
БЕЗОПАСНОСТЬЮ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.13.10 – Управление в социальных  
и экономических системах (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в учебно-научном комплексе автоматизированных систем и информационных технологий Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

Научный руководитель: **Хабибулин Ренат Шамильевич**,  
кандидат технических наук, доцент, начальник  
учебно-научного комплекса автоматизирован-  
ных систем и информационных технологий  
Академии ГПС МЧС России

Официальные оппоненты: **Колодкин Владимир Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор, директор  
института гражданской защиты Удмуртского  
государственного университета

**Тараканов Денис Вячеславович**,  
кандидат технических наук, преподаватель ка-  
федры пожарной тактики и основ аварийно-спа-  
сательных и других неотложных работ учебно-  
научного комплекса пожаротушения Ивановской  
пожарно-спасательной академии ГПС МЧС Рос-  
сии

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет  
ГПС МЧС России»**

Защита диссертации состоится «25» декабря 2017 года в 12:00 на заседа-  
нии диссертационного совета Д 205.002.01 в Академии Государственной про-  
тивопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Га-  
лушкина, 4, зал диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии Государ-  
ственной противопожарной службы МЧС России и на сайте  
<http://academygps.ru/upload/iblock/4af/4afb805dcfd321e9e2c4dfa423dbc2c0.pdf>

Автореферат разослан «1» ноября 2017 г.

Отзыв на автореферат с заверенной подписью и печатью просим направ-  
вить в Академию Государственной противопожарной службы МЧС России по  
указанному адресу.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



С.Ю. Бутузов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Статистические данные аварий и пожаров, происходящих на нефтегазовых объектах, показывают снижение их количества за последние 5 лет. Однако материальный ущерб в результате пожаров остается значительным и может составлять до 50% от суммарного ущерба от всех пожаров в стране за год. Значительный материальный ущерб формируется в том числе в связи с неправильным выбором пути обеспечения пожарной безопасности нефтегазовых объектов вызванный несовершенством существующих информационных систем управления пожарной безопасностью, используемых в процессе принятия решений.

В результате анализа проблем принятия решений при управлении пожарной безопасностью нефтегазовых объектов выявлено, что из-за большого количества возможных мероприятий, а также значительного числа параметров, влияющих на конечные значения пожарных рисков, сложно определить эффективные с технической и экономической точек зрения комбинации мероприятий, направленные на управление пожарной безопасностью без использования современных инструментов поддержки принятия решений. Сложность сравнения комбинаций мероприятий так же обусловлена необходимостью адаптивно изменять параметры систем обеспечения пожарной безопасности при динамически меняющихся значениях пожарных рисков. Изменение объекта защиты (установка систем пожарной сигнализации, систем пожаротушения, уменьшения вероятности пребывания нестационарных технологических установок и др.) при принятии управленческих решений требует пересчета массива пожарных рисков, что в свою очередь ведёт к снижению производительности труда, повышению затрат на обеспечение пожарной безопасности.

Отсутствие моделей и алгоритмов в современных программных продуктах поддержки принятия решений на нефтегазовых объектах приводит к тому, что лицо принимающее решение (ЛПР) не может объективно оценить весь спектр опасностей и определить оптимальную комбинацию мероприятий по управлению пожарной безопасностью. В большинстве случаев, в настоящее время, при принятии управленческих решений полагаются на мнения и опыт экспертов.

Совокупность приведенных фактов свидетельствует о недостаточном исследовании в области адаптивного управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах, в частности поддержки принятия управленческих решений. Таким образом, подтверждается актуальность разработки интеллектуальных методов и алгоритмов поддержки принятия решений и их интеграции в современные информационные системы управления пожарной безопасностью.

**Степень разработанности.** В основе настоящей диссертационной работы лежат результаты научной деятельности многих отечественных и зарубежных ученых, занимающихся вопросами исследования и разработки систем поддержки принятия решений, оценки и управления пожарными рисками, таких как: Топольский Н.Г., Мешалкин Е.А., Новиков Д.А., Бурков В.Н., Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Присяжнюк Н.Л., Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М., Швырков

С.А., Кончаренко С.Н, Дементьева Е.В, Быков А.А., Федоров А.В., Хабибулин Р.Ш., Aven T., Caputo A., Abrahamsen E., Mercı V., Pelagagge P. и др.

**Объект исследования** – система управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов.

**Предмет исследования** – модели и алгоритмы поддержки принятия решений в управлении пожарной безопасностью нефтегазовых объектов на основе риск-ориентированного подхода.

**Цель исследования** – разработка моделей и алгоритмов информационно-аналитической поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов на основе риск-ориентированного подхода.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

– анализ проблем поддержки принятия решений при управлении пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах с использованием риск-ориентированного подхода;

– разработка модели и алгоритма, направленного на определение оптимальной комбинации мероприятий по адаптивному управлению пожарной безопасностью нефтегазовых объектов;

– проведение компьютерного моделирования с целью оценки эффективности предложенных модели и алгоритма в управлении пожарной безопасностью нефтегазовых объектов;

– разработка структурной и функциональной схем, информационно-аналитического и специального программного обеспечения системы поддержки управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов.

**Научная новизна.** В процессе выполнения диссертационной работы впервые были получены новые научные данные:

– построена математическая модель определения оптимальной комбинации мероприятий по адаптивному управлению пожарной безопасностью нефтегазовых объектов на основе риск-ориентированного подхода, отличительной особенностью которой является применение трёхкритериальной целевой функции;

– разработан алгоритм и специальное программное обеспечение по адаптивному управлению пожарной безопасностью нефтегазовых объектов на основе предложенной математической модели;

– определена структура, функции системы поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов и ее основные элементы, в том числе схема ее взаимодействия с лицом принимающим решения.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы для поддержки принятия решений в рамках проведения экспертизы проектных решений и управления пожарными рисками, для формирования системы обеспечения пожарной безопасности, а также при разработке новых и модернизации существующих систем управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах.

**Методы исследования.** В ходе написания диссертационной работы были применены методы системного анализа, теории управления, методы оптимизации, математического и компьютерного моделирования.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель и алгоритм определения оптимальной комбинации мероприятий по адаптивному управлению пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах с использованием риск-ориентированного подхода;
- результаты компьютерного моделирования для определения оптимальной комбинации мероприятий по управлению пожарной безопасностью на основе разработанной математической модели и алгоритма;
- структура и функции системы поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах, состав информационного обеспечения лица принимающего решения.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением апробированного математического аппарата, корректным использованием исходных данных, согласованностью полученных результатов с результатами работ других исследователей.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены на всероссийских конференциях молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Томск, 2012 г., Тюмень, 2013 г.), международных научно-технических конференциях «Системы безопасности» (Москва, 2014, 2015 гг.), 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (с. Дивноморское, 2015), международных научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, 2011, 2015 - 2017 гг.), научном семинаре в Юлихском исследовательском центре (Forschungszentrum Jülich, г. Юлих, Германия, 2015), научных семинарах кафедры пожарной безопасности Гентского университета (Бельгия, г. Гент, 2015-2016 гг.), 9-й международной научной конференции по агентному моделированию и искусственному интеллекту ICAART-2017 (Португалия, г. Порту, 2017 г.), научно-технических семинарах учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий Академии ГПС МЧС России (2014-2017 гг.)

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 18 работ, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК. 3 работы опубликованы в единоличном авторстве. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** В совместных публикациях результаты, связанные с анализом текущей ситуации в исследуемой области, с разработкой математической модели, алгоритмов управления, разработки основных компонентов системы управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов, результаты и анализ компьютерного моделирования выполнены автором самостоятельно.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы нашли свое применение:

– в нефтегазовой компании ООО «Ойлсид» при разработке программы мероприятий по управлению пожарной безопасностью в ходе разработки паспорта безопасности опасного производственного объекта;

– научно-исследовательской работе по теме «Повышение эффективности управления пожарным риском на производственных объектах на основе интернет-картографических систем»;

– в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России при изучении дисциплин «Информационные технологии управления», «Информационные технологии в сфере безопасности».

Реализация результатов исследования подтверждена соответствующими актами.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 165 страниц. Работа иллюстрирована 39 рисунками, содержит 14 таблиц и 5 приложений. Библиографический список включает в себя 103 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет исследования, поставлена цель и задачи диссертационной работы, представлены сведения о научных результатах и практической значимости исследования.

**В первой главе «Проблемы принятия управленческих решений при обеспечении пожарной безопасности на нефтегазовых объектах»** проведен анализ статистических данных о пожарах на нефтегазовых объектах, результаты которого говорят о том, что 92-99% общего материального ущерба от пожаров на производственных объектах может формироваться за счет 3-10 % крупных пожаров (рис. 1).



Рисунок 1 – Сравнение материального ущерба от крупных пожаров к общему материальному ущербу от всех пожаров на нефтегазовых объектах

Используя данные федеральной службы государственной статистики, определено, что с каждым годом уменьшается среднегодовая численность работников в нефтегазовой промышленности. Данный факт, в том числе, объясняется тем, что производство становится всё более автоматизированным, активно идёт

внедрение информационных технологий. Расположение пожароопасных технологических аппаратов, на таких объектах, становится более компактным, происходит усложнение технологических процессов. Вследствие чего возрастает проблема поиска оптимальных решений по обеспечению пожарной безопасности данных объектов с использованием риск-ориентированного подхода.

В результате анализа причинно-следственных связей с помощью разработанной диаграммы Ишикавы (рис. 2), выявлено, что одной из проблем принятия управленческих решений при управлении пожарными рисками на нефтегазовых объектах является отсутствие применения активных систем поддержки принятия решений с использованием интеллектуальных алгоритмов.

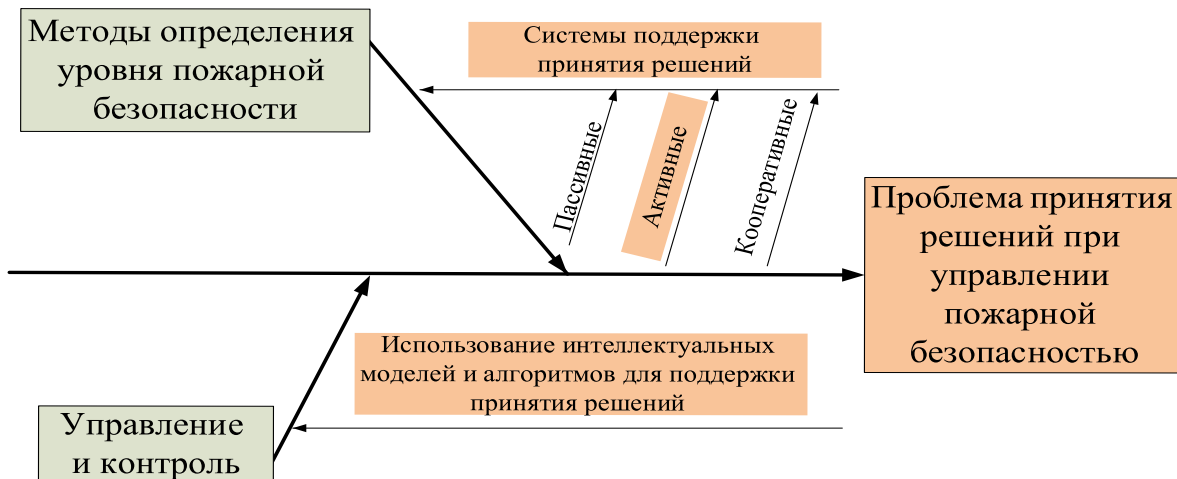


Рисунок 2 – Причинно-следственная диаграмма проблем принятия решений при управлении пожарной безопасностью

В результате анализа современных информационных систем на предмет использования инструментов поддержки принятия решений, направленных на управление пожарными рисками, установлено, что такие важные функции, как база данных по статистической информации (42,9 %); геоинформационные сервисы (28,6 %), используются менее чем в половине рассмотренных систем, а функции поддержки принятия управленческих решений практически отсутствуют (рис. 3).



Рисунок 3 – Распределение реализуемых функций в системах управления пожарными рисками

Во второй главе «Разработка моделей и алгоритмов адаптивного управления пожарной безопасностью на территории нефтегазовых объектов на основе риск-ориентированного подхода» разработана математическая модель и алгоритмы подбора комбинаций возможных мероприятий по управлению пожарной безопасностью. Сформирована структура базы данных мероприятий по управлению пожарной безопасностью и их классификация.

Для оптимизации предлагаемых решений разработана целевая функция, которая отражает количественное представление эффективности найденных решений. Опираясь на первостепенные задачи управления пожарной безопасностью – безопасность людей и экономическая эффективность, предложена целевая функция, состоящая из 3-х параметров:

1. количество расчетных величин пожарных рисков на территории объекта защиты, которые не превышают приемлемые значения ( $Q$ );
2. приведенные затраты для осуществления мероприятий ( $P$ );
3. параметр среднего отклонения недопустимых расчетных величин пожарных рисков на территории объекта защиты и прилегающей к нему селитебной зоне от приемлемых значений ( $D$ ).

Исходя из первоочередной задачи при оптимизации набора мероприятий по управлению пожарной безопасностью наибольший приоритет имеет параметр  $Q$ , отражающий количество приемлемых значений пожарных рисков на территории. Следующим по важности является экономическая составляющая ( $P$ ). В спорных ситуациях, когда у нескольких комбинаций мероприятий параметры  $K$  и  $P$  являются равными, а требуемые величины пожарных рисков являются недостижимыми, ключевым параметром является  $D$ , который обеспечивает равномерное распределение зон риска на территории объекта. Таким образом, целевая функция в разрабатываемой модели выглядит следующим образом:

$$f = (\max(Q), \min(P), \max(D)) \quad (1)$$

Для определения количества величин пожарных рисков на территории нефтегазового объекта, которые являются приемлемыми в рассматриваемом случае используется следующая формула:

$$Q = \sum_{j=1}^J (\alpha(R_j)) + \sum_{m=1}^M (\beta(I_m)) + \gamma(S), \quad (2)$$

где

$$\alpha(R_j) = \begin{cases} 1, & x \leq R_a; \\ 0, & x > R_a \end{cases} \quad (3)$$



$$\beta(I_m) = \begin{cases} 1, & x \leq I_a; \\ 0, & x > I_a; \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma(S) = \begin{cases} 1, & x \leq S_a; \\ 0, & x > S_a; \end{cases} \quad (5)$$

$R$  – итоговое значение индивидуального пожарного риска для работников объекта защиты;

$J$  – количество работников на объекте защиты;

$I$  – итоговое значение индивидуального пожарного риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$M$  – количество объектов с людьми в селитебной зоне, прилегающей к объекту защиты;

$S$  – итоговое значение величины социального пожарного риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$R_a$  – допустимое значение величины индивидуального пожарного риска для работников объекта защиты;

$I_a$  – допустимое значение величины индивидуального пожарного риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$S_a$  – допустимое значение величины социального пожарного риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$\alpha$  – критерий приемлемости значения величины индивидуального пожарного риска для работников объекта защиты;

$\beta$  – критерий приемлемости значения величины индивидуального риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$\gamma$  – критерий приемлемости значения величины социального пожарного риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта защиты;

$Q$  – количество приемлемых величин пожарных рисков.

Приведенные затраты для осуществления мероприятий ( $P$ ) включают в себя капитальные затраты для реализации и эксплуатационные расходы для каждого варианта обеспечения пожарной безопасности (комбинаций мероприятий).

Приведение заданных стоимостных показателей к текущему периоду времени производится путем умножения их на коэффициент сравнительной экономической эффективности дополнительных капитальных вложений.

Параметр ( $D$ ) отражает среднее отклонение недопустимых расчетных величин пожарных рисков на объекте защиты и прилегающей к нему селитебной зоне от приемлемых значений. Данный параметр принимает значение от 0 до 1 и используется в случае, когда не все значения пожарных рисков являются приемлемыми и необходим для поиска координат на территории нефтегазового объекта, где значения рисков будут наиболее сильно приближены к допустимым значениям:

$$D = \frac{A + B + C}{Z + Y + \gamma(S)}, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{\sum_{z=1}^Z R_a/R_z}{Z}; \quad (7)$$

$$B = \frac{\sum_{y=1}^Y I_a/I_y}{Y}; \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} \frac{S_a}{S}, S > S_a; \\ 0, S \leq S_a \end{cases} \quad (9)$$

где

$A$  – безразмерный параметр среднего отклонения недопустимых величин индивидуальных рисков на территории объекта защиты (меньших  $R_a$ ) от допустимого значения ( $R_z$ );

$R_z$  – значения величин недопустимых индивидуальных рисков на территории объекта защиты;

$Z$  – количество недопустимых значений величин индивидуальных рисков на территории объекта защиты;

$B$  – безразмерный параметр среднего отклонения недопустимых величин индивидуальных рисков в селитебной зоне (меньших  $I_a$ ) от допустимого значения ( $I_y$ );

$I_y$  – значения недопустимых расчетных величин индивидуальных рисков в селитебной зоне;

$Y$  – количество недопустимых расчетных величин индивидуальных рисков в селитебной зоне;

$C$  – безразмерный параметр отклонения величины социального риска в селитебной зоне от допустимого значения.

Основным требованием к выбору математического метода оптимизации являлась возможность поиска глобального оптимума среди множества локальных. Для решения этой задачи использована теория генетических алгоритмов.

При построении математической модели поиска оптимальных комбинаций мероприятий по управлению пожарной безопасностью на территории нефтегазовых объектов использовалась классическая модель генетических алгоритмов, со следующими модификациями для повышения эффективности решения требуемой задачи:

- начальная популяция (комбинация мероприятий) генерируется по специально разработанному алгоритму, учитывающему экономическую эффективность каждого мероприятия и их влияние на величину пожарного риска на территории рассматриваемого нефтегазового объекта;

- вместо использования бинарной строки, используется хромосома, гены которой являются идентификаторами мероприятий;

- для создания наборов из различного количества мероприятий используется измененная операция мутации, заключающейся в случайном исключении одного гена (мероприятия) из хромосомы (комбинации мероприятий).

В предлагаемом подходе генами являются мероприятия, где хромосома содержит массив с индикаторами каждого мероприятия содержащегося в нем, который записывается в следующем виде:

$$v = ([M1], [M2], [M3], \dots [Mk]), \quad (10)$$

где  $M1, M2, M3, Mk$  – идентификаторы мероприятий.

В результате одна хромосома является комбинацией мероприятий по управлению пожарной безопасностью. Функция соответствия оценивает хромосомы по степени их приспособленности к выполнению критерия оптимизации.

Оценка функции соответствия хромосомы выполняется в три шага:

1. Преобразовать генотип хромосомы в фенотип. Поиск мероприятий в базе данных по идентификаторам в хромосоме  $n^k=(M^k)$ ,  $k=1,2,\dots,p\_size$ , где  $p\_size$  – число мероприятий в исходной популяции.

2. Вычислить целевую функцию (1).

3. Преобразовать целевую функцию в значение функции соответствия. Для решаемой задачи функция соответствия эквивалентна целевой функции.

$$eval(v_k) = f(n^k), k = 1, 2, \dots, p\_size. \quad (11)$$

Для отбора хромосом (комбинаций мероприятий) используется метод «колесо рулетки». Процесс отбора происходит следующим образом:

1. Вычислить значение функции соответствия  $eval(v_k)$  для каждой хромосомы  $v_k$  по формуле (1).

2. Вычислить общую функцию соответствия популяции:

$$F = \sum_{k=1}^{pop\_size} eval(v_k) - j = \min_{j=1, p\_size} \{eval(v_j)\}, k = 1, 2, \dots, p\_size. \quad (12)$$

3. Вычислить вероятность отбора  $P_k$  для каждой хромосомы  $v_k$ :

$$P_k = \frac{eval(v_k) - j = \min_{j=1, p\_size} \{eval(v_j)\}}{F}, k = 1, 2, \dots, p\_size. \quad (13)$$

4. Вычислить совокупную вероятность  $q_k$  для каждой хромосомы  $v_k$ :

$$q_k = \sum_{j=1}^k P_j, k = 1, 2, \dots, p\_size. \quad (14)$$

Процесс отбора начинается с вращения колеса  $p\_size$  раз; при этом каждый раз выбирается одна хромосома по следующему алгоритму:

1. Генерируется случайное число  $r$  из интервала  $[0, 1]$ .

2. Если  $r \leq q_1$ , то выбираем первую хромосому  $v_1$ ; иначе выбираем  $k$ -ую хромосому ( $2 \leq k \leq p\_size$ ) такую, что  $q_{k-1} \leq r \leq q_k$ .

Для скрещивания хромосом использован метод с одной точкой обмена.

Мутация состоит в изменении одного или большего числа хромосом с вероятностью равной коэффициенту мутации. В отличие от классической модели генетических алгоритмов, для создания комбинаций из разного количества мероприятий, была добавлена вероятность случайного удаления одного гена из хромосомы (75%).

В третьей главе «Компьютерное моделирование для решения задачи поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов» сформирована структура классов информационной системы (ИС) управления пожарной безопасностью, а также структура классов модуля оптимизации значений пожарных рисков на территории нефтегазового объекта. Структура разработанной ИС представлена на рис. 4.

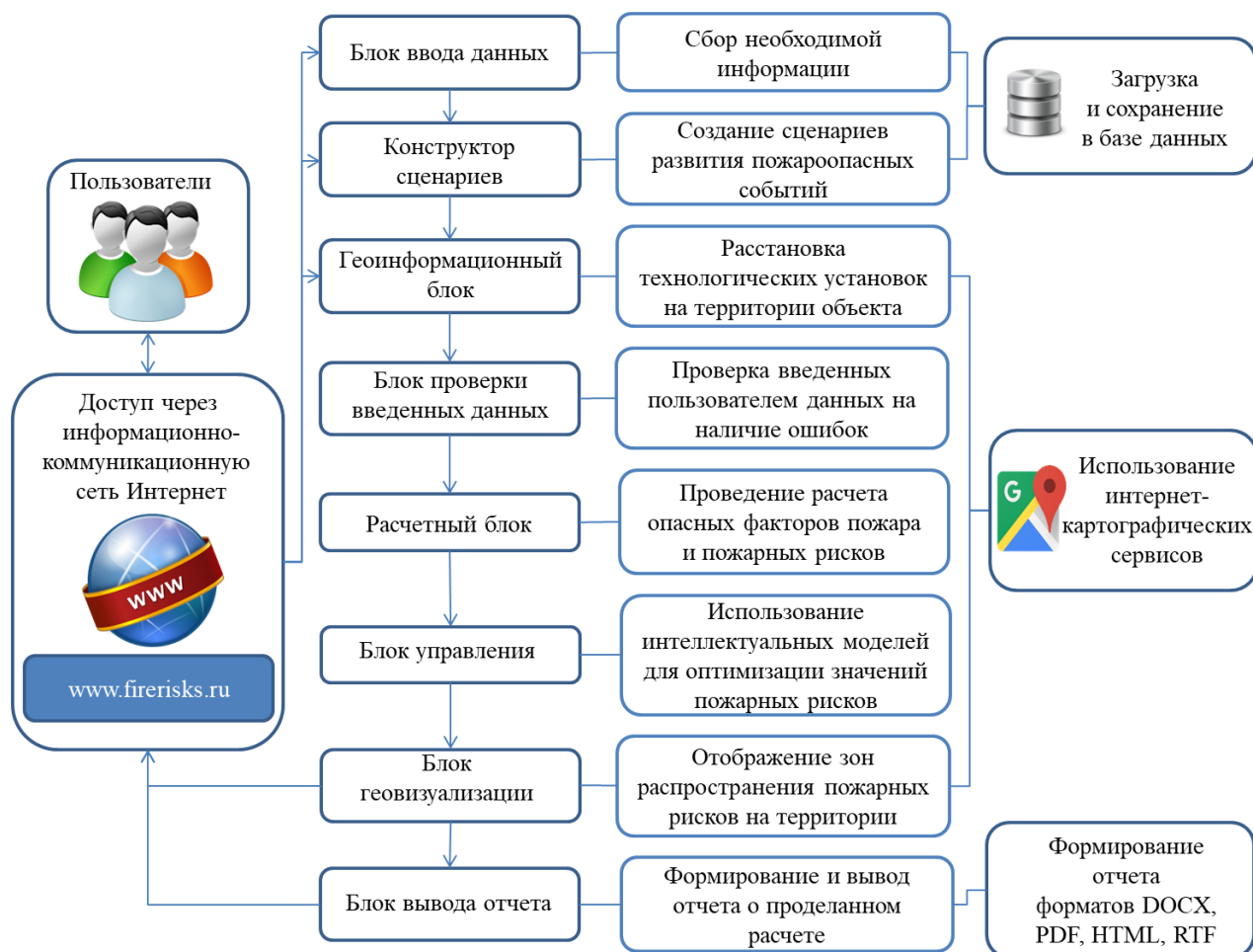


Рисунок 4 – Структура разработанной ИС

Для применения генетического алгоритма при выполнении задачи оптимизации создан блок оптимизации расчётных величин пожарного риска (рис. 5), позволяющий проводить компьютерное моделирование и анализ эффективности полученных моделей. Данный блок выполнен в виде информационного класса, содержащего следующие функции:

1. Генерация популяции (случайная генерация массива чисел обозначающих координаты объекта).
2. Мутация (инвертирование одного или нескольких случайных битов числа).
3. Скрещивание (обмен битами между двумя особями).
4. Колесо рулетки (отбирает особей для формирования новой популяции).
5. Целевая функция (определяет степень приспособленности особи в популяции).

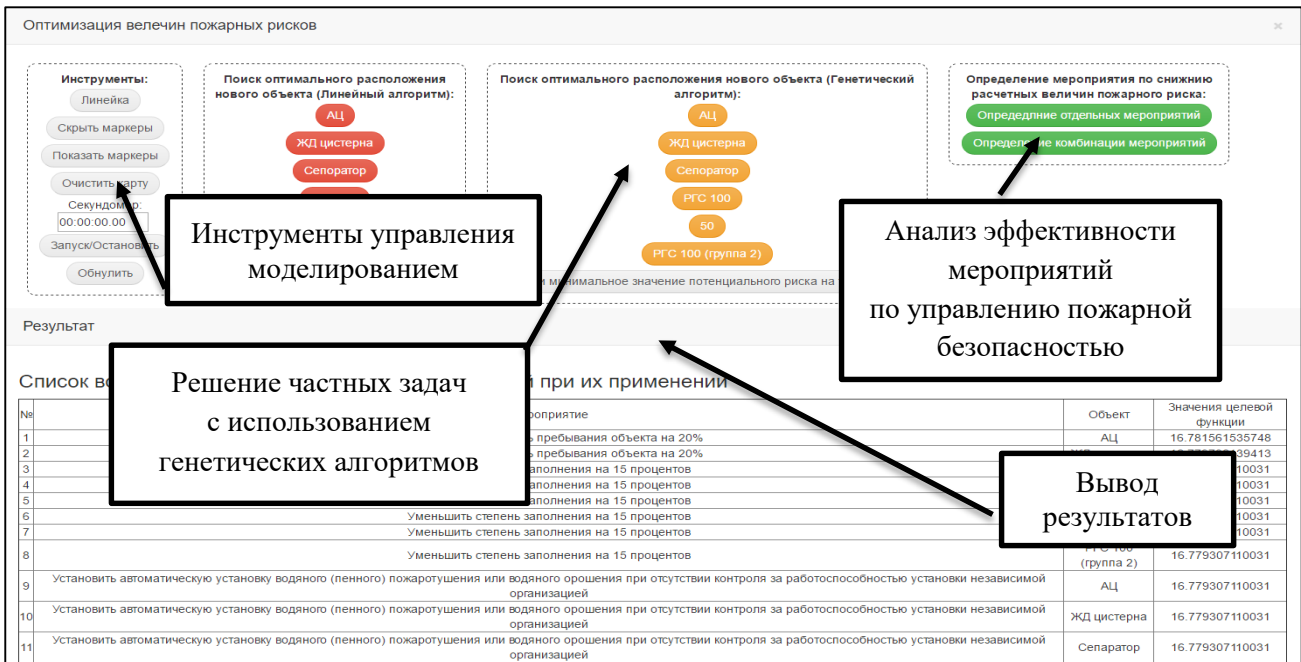


Рисунок 5 – Интерфейс компьютерной программы для проведения вычислительных экспериментов

Эффективность программной разработки основана на возможности проводить значительное количество расчетных *online*-операций с учётом множества наружных технологических установок и элементов системы противопожарной защиты на территории нефтегазовых объектов. За счет увеличения скорости и удобства проводимых расчетов, увеличивается вариативность анализа управленческих решений, что в свою очередь ведет к более качественному анализу объекта защиты и формированию индивидуальных и эффективных мер по управлению пожарной безопасностью. Данные операции проводятся с учётом анализа пожарной опасности объекта защиты, на основе технологических параметров ведения процессов, конструктивных особенностей и размещения технологического оборудования в соответствии с требованиями действующих нормативно-технических документов.

В качестве производственного объекта, на котором проводилась апробация разработанной модели, выбрана типовая газораспределительная станция (ГРС). Территория ГРС разбита на следующие зоны:

- А — зона работы операторов на железнодорожной эстакаде (2 чел.);
  - Б — зона работы операторов у резервуарной группы № 1 (2 чел.);
  - В — зона работы операторов у резервуарной группы № 2 (2 чел.);
  - Г — зона работы операторов у резервуарной группы № 3 (2 чел.);
  - Д — зона работы операторов у сепаратора (1 чел.);
  - Е — зона работы операторов на автогазозаправочной станции (АГЗС) (2 чел.);
  - Ж — административно-бытовой комплекс (АБК) (8 чел.).
- Помимо основных, обозначены прилегающие объекты (зоны):
- З — торговый комплекс (1000 чел.);
  - И — жилой микрорайон (300 чел.).

План ГРС с графическим отображением распределения зон потенциального риска на территории ГРС и прилегающей селитебной территории представлен на рис. 6.

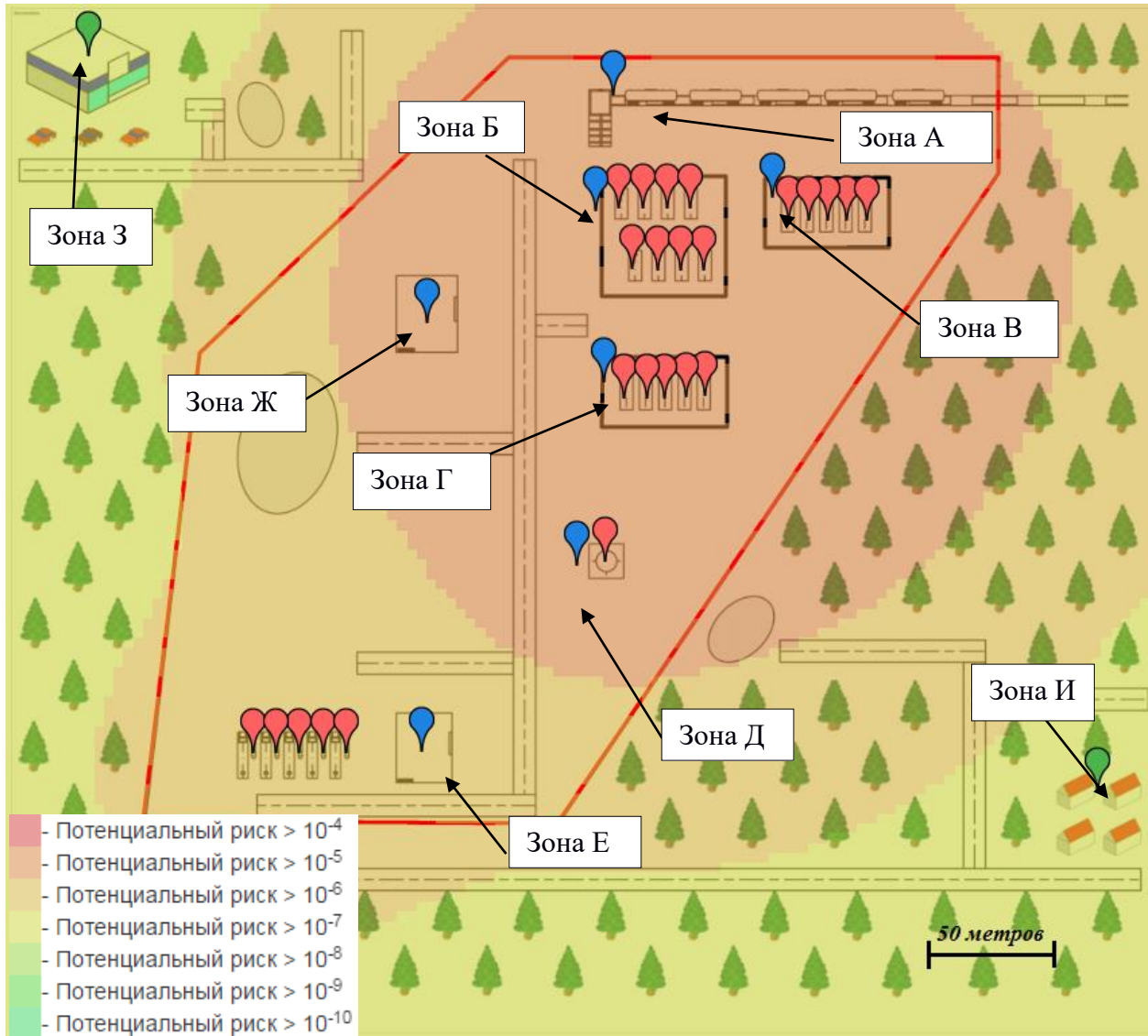


Рисунок 6 – Зоны распространения потенциального пожарного риска на территории ГРС

и прилегающей селитебной территории: — здания предприятий;

— технологические установки; — селитебные зоны

Анализ эффективности разработанной модели и алгоритма проходил в несколько этапов, с использованием предложенной целевой функции. На первом этапе был сформирован примерный список мероприятий по управлению пожарной безопасностью с условными капитальными, эксплуатационными и приведенными затратами от базовой величины  $X$  и оценены параметры  $Q$  и  $D$  целевой функции при использовании каждого мероприятия по отдельности (таблица 1).

Таблица 1 – Список возможных мероприятий и параметров целевой функции  $Q$  и  $D$  при их применении

№	Мероприятие	Объект	Q	D
1	Уменьшить вероятность пребывания объекта на 20%	АЦ	16	0,781
2		ЖД цистерна	16	0,779

Продолжение таблицы 1

3	Уменьшить степень заполнения резервуара на 15%	АЦ	16	0,779
4		ЖД цистерна	16	0,779
5		Сепаратор	16	0,779
6		РГС 100	16	0,779
7		РГС 50	16	0,779
8		РГС 100 (группа 2)	16	0,779
9	Установить автоматическую установку водяного (пенного) пожаротушения или водяного орошения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией	АЦ	16	0,779
10		ЖД цистерна	16	0,779
11		Сепаратор	16	0,779
12		РГС 100	16	0,779
13		РГС 50	16	0,779
14		РГС 100 (группа 2)	16	0,779
15	Установить автоматическую установку пожарной сигнализации	АЦ	16	0,788
16		ЖД цистерна	16	0,781
17		Сепаратор	16	0,790
18		РГС 100	17	0,871
19		РГС 50	17	0,953
20		РГС 100 (группа 2)	17	0,974
21	Установить автоматическую установку пожаротушения или водяного орошения при наличии контроля за работоспособностью установки независимой организации (вне зависимости от типа установки пожаротушения)	АЦ	16	0,779
22		ЖД цистерна	16	0,779
23		Сепаратор	16	0,779
24		РГС 100	16	0,779
25		РГС 50	16	0,779
26		РГС 100 (группа 2)	16	0,779
27	Установить остальные типы автоматических установок пожаротушения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией	АЦ	16	0,779
28		ЖД цистерна	16	0,779
29		Сепаратор	16	0,779
30		РГС 100	16	0,779
31		РГС 50	16	0,779
32		РГС 100 (группа 2)	16	0,779
33	Установить отбортовку площадью 30 м <sup>2</sup>	АЦ	16	0,779
34		ЖД цистерна	16	0,779
35		Сепаратор	16	0,779

На следующем этапе проводился поиск комбинаций мероприятий с использованием предложенной модели с целью её анализа и подбора наилучших параметров. Критерием остановки поиска являлась ситуация, когда предлагаемые мероприятия сходятся на 90 и более процентов. После ряда вычислительных экспериментов были определены следующие оптимальные настройки генетического алгоритма:

- вероятность скрещивания – 80%;
- вероятность мутации – 30%.

Мутация 30% особей (идентификаторов мероприятий) была выбрана так как, при этом значении увеличивается вариативность предлагаемых комбинаций мероприятий, что ведет к увеличению качества результатов работы алгоритма. Использование показателя ниже 30% ведет к уменьшению вариативности рассматриваемых комбинаций и ухудшению качества результатов (рис. 7). При увеличении вариативности наблюдается снижение качества предлагаемых комбинаций мероприятий.

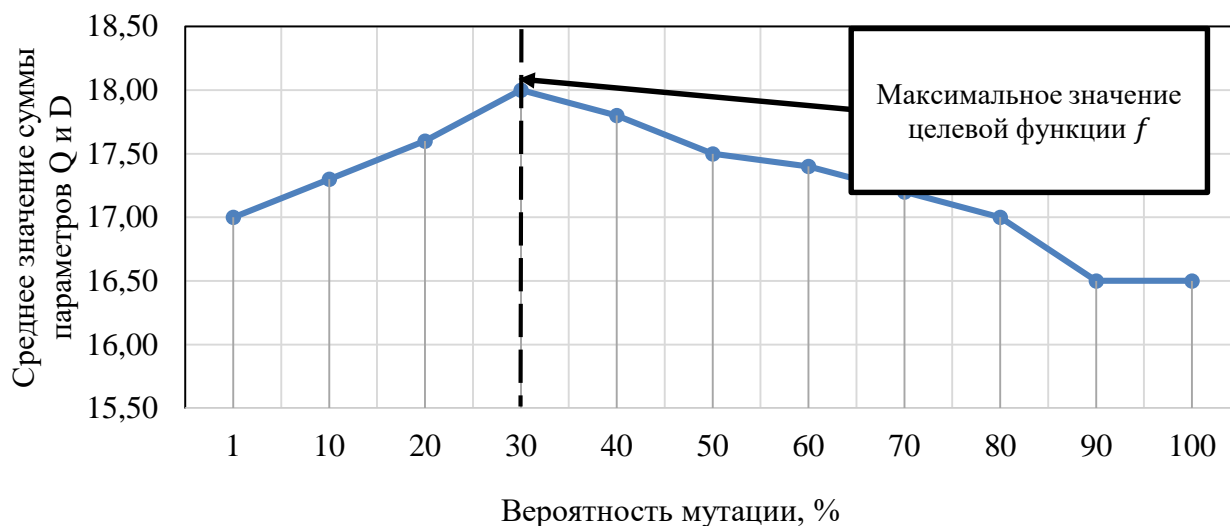


Рисунок 7 – Зависимость среднего значения суммы параметров  $Q$  и  $D$  целевой функции от вероятности мутации

Вероятность скрещивания выбиралась из промежутка 50-90%, и была определена как 80%, так как при этом значении наблюдалась наиболее большая вариативность предлагаемых управленческих решений (рис. 8).

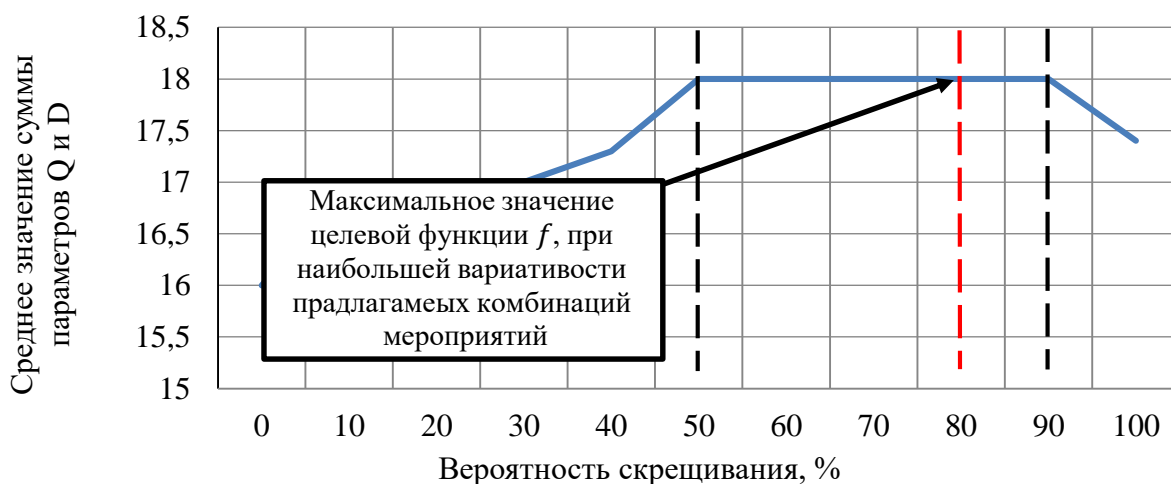


Рисунок 8 – Зависимость среднего значения суммы параметров  $Q$  и  $D$  целевой функции от вероятности скрещивания

Время выполнения подбора мероприятий составило 214 мин со следующими характеристиками ЭВМ:

- материнская плата: ASUS X99-A (RTL) LGA2011-3;
- процессор CPU Intel Core i7-5820K 3.3 GHz / 6 core;
- оперативная память: DDR4 PC4-17000 (4x8 Gb).

Во всех сериях вычислительного эксперимента предложенная модель всегда находила комбинации мероприятий с высоким значением целевой функции, хотя при подборе комбинаций возможны варианты с большим количеством мероприятий, но низким значением целевой функции. В результате ЛПР получает информацию о множестве альтернативных вариантов комбинаций с высоким значением целевой функции при требуемом количестве мероприятий в одной комбинации.



Так как в классическом представлении генетических алгоритмов отсутствует возможность определения оптимальной комбинации мероприятий для разного их количества в пределах одной серии моделирования, необходимо проводить повторные моделирования для разного количества мероприятий в наборе. Отсюда следует, что время выполнения моделирований будет увеличиваться прямо пропорционально требуемому количеству мероприятий.

Для увеличения скорости выполнения моделирования применен подход используемый в адаптивной модели генетических алгоритмов, заключающийся в случайном удалении одного мероприятия из набора в пределах одной серии моделирования.

После ряда экспериментов было выявлено, что вероятность удаления гена (мероприятия) из хромосомы (мероприятия из набора), при использовании адаптивной модели, значительно влияет на время моделирования, при этом качество подобранных комбинаций до определённого момента не меняется (рисунок 9). Поэтому вероятность удаления гена (мероприятия) из хромосомы (набора мероприятий) принята равной 75 %.

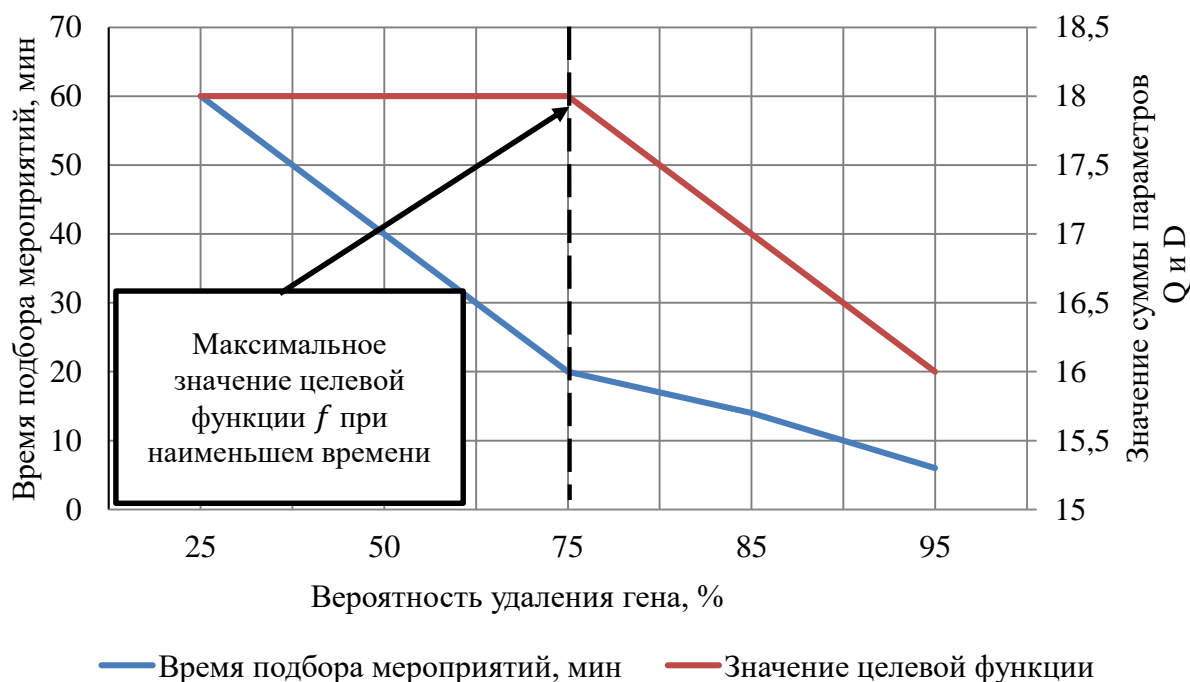


Рисунок 9 – Зависимость времени подбора комбинаций мероприятий и суммы параметров целевой функции  $Q$  и  $D$  от вероятности удаления гена из хромосомы

На рисунке 10 отражены полученные данные об отношении затрачиваемого времени на серию моделирований к количеству рассматриваемых мероприятий в наборе при использовании классической и адаптивной модели генетических алгоритмов.

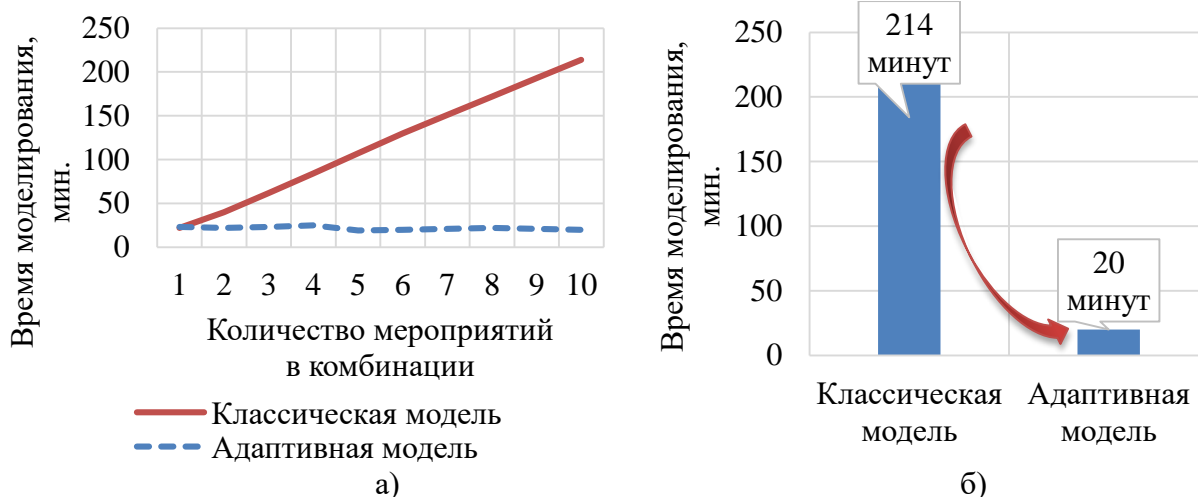


Рисунок 10 – Сравнение времени моделирования при использовании классической и адаптивной модели генетических алгоритмов. а) зависимость затрачиваемого времени на серию моделирований к количеству рассматриваемых мероприятий в наборе б) время затраченное на поиск оптимального набора мероприятий для экспериментального проекта

Таким образом, адаптивная модель показала значительное увеличение скорости подбора комбинации мероприятий по управлению пожарной безопасностью.

После проведения подбора мероприятий с использованием предложенной модели, определен список возможных комбинаций. В результате сформирована таблица оптимальных комбинаций при разном количестве мероприятий (таблица 2).

Таблица 2 – Ранжирование комбинаций мероприятий по управлению пожарной безопасностью при различном количестве решений в них

Количество мероприятий	Номера решений по табл. 1	Q	D	П
10	7, 8, 1, 2, 15, 18, 19, 26, 27, 33	18	0	2,42X
9	7, 8, 1, 2, 15, 18, 19, 26, 27	18	0	2,38X
8	5, 1, 15, 17, 18, 19, 22, 24	18	0	2,24X
7	7, 1, 2, 15, 18, 19, 26	18	0	1,88X
6	5, 1, 15, 18, 19, 22	18	0	1,58X
5	5, 16, 18, 20, 10	18	0	1,05X
4	1, 15, 16, 19	18	0	1,03X
3	5, 15, 16	18	0	0,62X
2	7, 15	17	0,98	0,46X

По результатам проведенных серий компьютерного моделирования сформулированы следующие выводы:

1. Предложенная математическая модель обеспечивает поиск комбинации мероприятий по управлению пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах с использованием современных информационных систем за приемлемое количество времени (до 30 минут).

2. Использование концепции адаптивных генетических алгоритмов, заключающейся в добавлении операции случайного удаления мероприятия из набора во время моделирования увеличивает скорость выполнения моделирования пропорционально количеству рассматриваемых мероприятий в наборе.

3. Представленная модель помимо значительного уменьшения необходимого времени для проведения анализа эффективности разных комбинаций мероприятий по управлению пожарной безопасностью, обладает достаточно высокой вариативностью предлагаемых ЛПП вариантов обеспечения пожарной безопасности.

В четвертой главе «Разработка системы поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах» предложена структура системы поддержки управления пожарной безопасностью, определены ее основные элементы, разработано дерево целей (рис. 11).



Рисунок 11 – Дерево целей системы поддержки адаптивного управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов

С учетом поставленных задач разработана структурная схема системы поддержки управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов (рис. 12).

Таким образом, в процессе поддержки управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах участвуют три модуля.

**Вычислительный модуль** служит инструментом, позволяющим оценивать эффективность предлагаемых мероприятий, с помощью сформулированных параметров целевой функции, к которым относятся показатели величины пожарных рисков объекта защиты, показатели экономической эффективности и т.д.

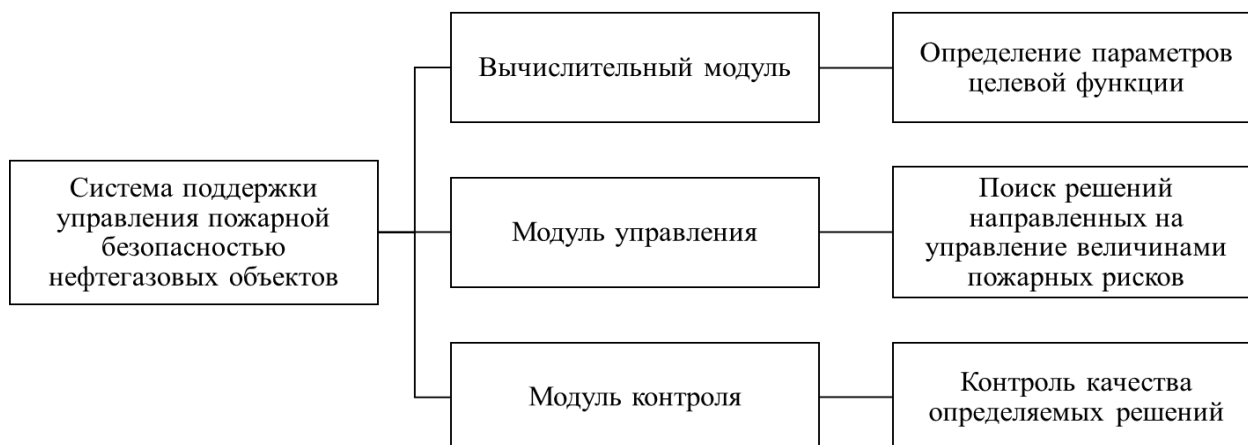


Рисунок 12 – Структурная схема системы поддержки управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов

Ввод исходных данных производится, основываясь на технической документации к инженерным сооружениям, находящимся на объекте, статистики отказов технологического оборудования, справочной информации о пожароопасных веществах, обращающихся на объекте защиты, других необходимых параметрах.

**Модуль управления** осуществляет поиск решений, направленных на адаптивное управление пожарной безопасностью методом перебора возможных вариантов или с использованием интеллектуальных оптимизационных методов. Данный модуль включает в себя базу данных, в которой хранятся мероприятия по управлению пожарной безопасностью. Для удобства работы с мероприятиями, а также простого их добавления и редактирования, разработана классификация. В ходе своей работы модуль управления взаимодействует с пользователем и обладает полным доступом ко всем функциям системы, входным данным и результатам расчета пожарных рисков. В процессе работы возможно добавление систем противопожарной защиты, направленных на уменьшение вероятности возникновения ОФП или уменьшения вероятности возможного поражения при возникновении аварий или изменения их параметров в зависимости от ситуации, которая складывается при моделировании возникновения пожара на различных участках территории объекта защиты. Получив команду от пользователя о запуске процедуры поиска мероприятий, направленных на снижение расчетных величин пожарных рисков, модуль управления адаптивно вносит изменения в рассматриваемый проект, проводит необходимые расчеты, оценивает качество полученных результатов с учетом значения целевой функции и выводит отчет о своей работе ЛПП через модуль контроля для принятия окончательного решения.

**Модуль контроля** обеспечивает вывод информации о предлагаемых решениях, направленных на снижение величин пожарных рисков. При помощи модуля контроля ЛПП может оценить зоны распространения пожарных рисков при каждом предлагаемом решении, а также оценить экономическую целесообразность каждого решения.

Работа системы происходит до окончания процесса подбора мероприятий по управлению пожарной безопасностью, после чего информация о выбранных мероприятиях сохраняется в базе данных. Данная информация в дальнейшем может быть использована, как для оценки действий специалиста, выполняющего управление пожарной безопасностью, так и для дальнейшей обработки и выработки правил для формирования базы знаний.

В результате создания информационной системы адаптивного управления пожарной безопасностью разработана структурная схема взаимодействия СПУ с ЛПР (рис. 13).

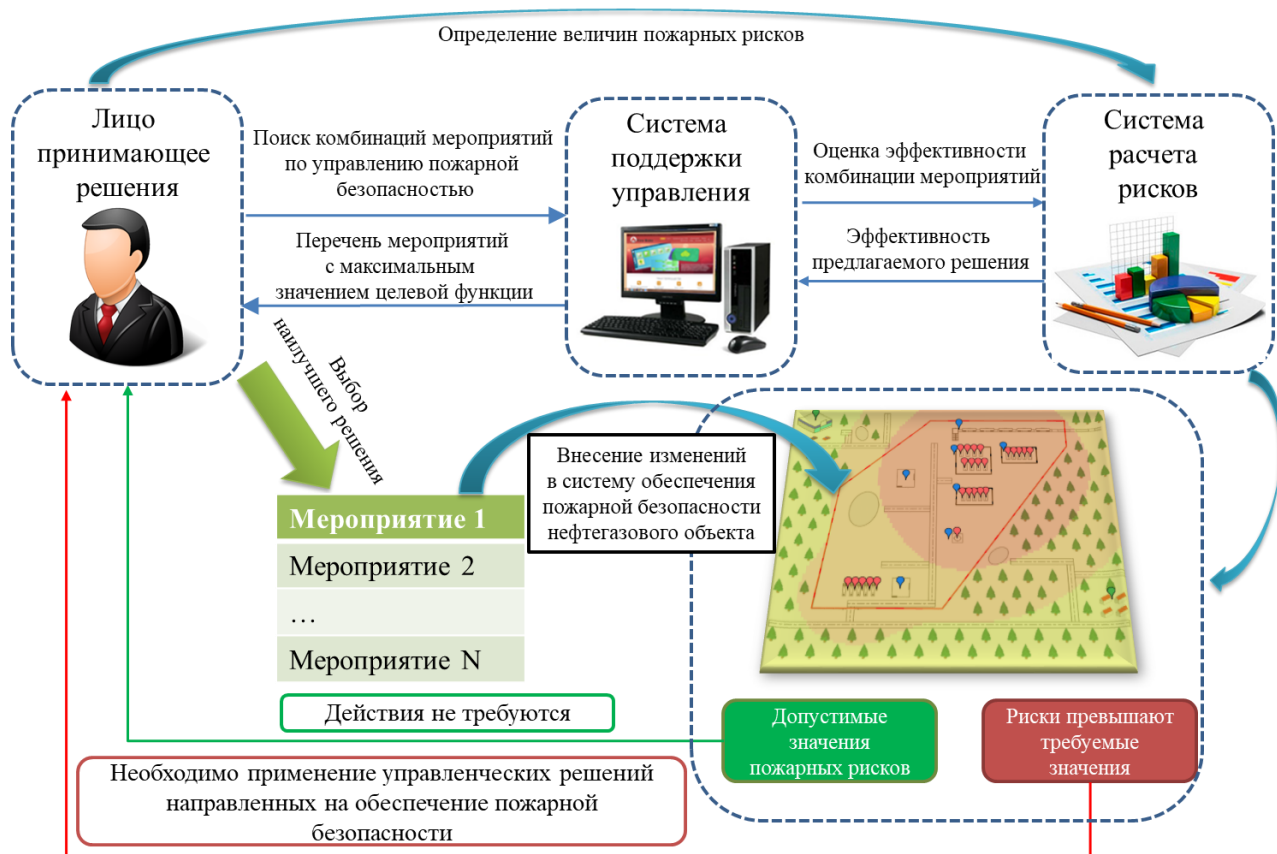


Рисунок 13 – Схема взаимодействия СПУ с ЛПР

На основе структурной схемы разработан алгоритм взаимодействия ЛПР с СПУ при управлении пожарной безопасностью нефтегазовых объектов (рис. 14), который определяет роль ЛПР в процессе принятия решений. Определены основные задачи, стоящие перед ЛПР во время процесса управления пожарной безопасностью.

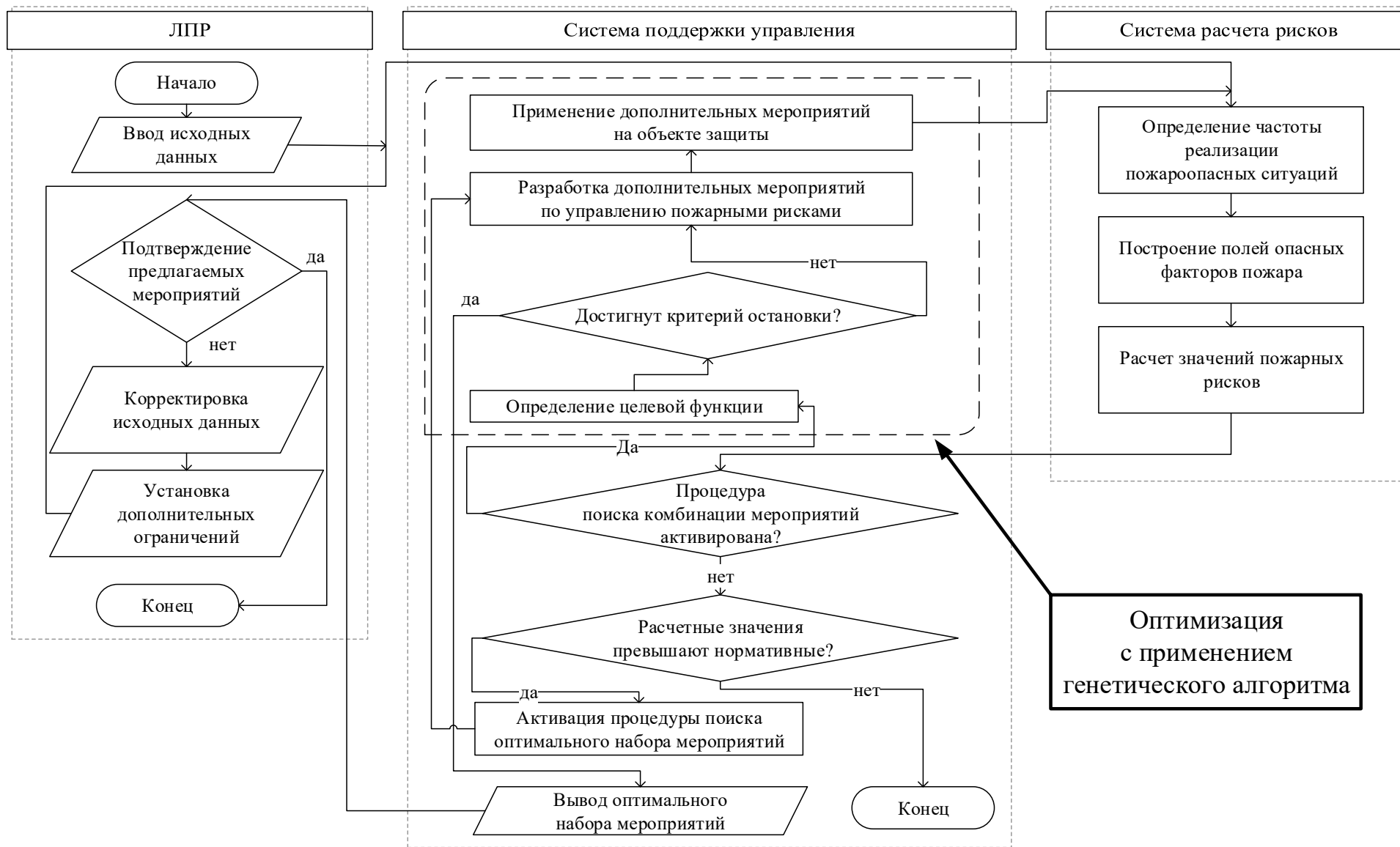


Рисунок 14 – Алгоритм взаимодействия ЛПР с СПУ при управлении пожарной безопасностью

**В приложении** приведены листинг кода разработанных программ для ЭВМ, свидетельства о государственной регистрации, акты внедрения результатов диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Анализ современных информационных систем с точки зрения использования инструментов поддержки принятия решений, направленных на управление пожарными рисками, выявил, что такие важные функции, как база данных по статистическим данным (42,9 %); геоинформационные сервисы (28,6 %), используются менее чем в половине рассмотренных систем, а функции поддержки принятия управленческих решений отсутствуют.

2. Разработана математическая модель и алгоритм подбора комбинации оптимальных мероприятий по управлению пожарной безопасностью на территории нефтегазовых объектов. В математической модели использовался подход с использованием генетических алгоритмов, а также специально разработанная 3-х критериальная целевая функция на основе риск-ориентированного подхода, учитывающая значения пожарных рисков и экономической эффективности предлагаемых мероприятий.

3. На основе разработанных алгоритмов создана информационная система поддержки управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов на основе риск-ориентированного подхода для проведения компьютерного моделирования и анализа полученных моделей. Проведена настройка параметров генетического алгоритма для решения поставленной задачи. Применена концепция адаптивных генетических алгоритмов, сокращающая время выполнения моделирования прямо пропорционально требуемому количеству мероприятий (в рамках тестирования время моделирования сократилось в 10 раз). На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. По результатам компьютерного моделирования поиска комбинаций мероприятий по управлению пожарной безопасностью на типовом нефтегазовом объекте, сделан вывод, что предложенная модель значительно увеличивает количество возможных вариантов обеспечения пожарной безопасности объекта защиты (до 5 вариантов различных комбинаций мероприятий для требуемого количества мероприятий в наборе) и позволяет ЛПР более эффективно формулировать список мероприятий по управлению пожарной безопасностью, чем при учете только методов экспертной оценки.

5. Предложена структура и алгоритм работы системы поддержки управления пожарной безопасностью нефтегазовых объектов и ее основные элементы, определены цель и задачи такой системы. Выявлен необходимый вид и количество информации для ЛПР во время процесса управления пожарной безопасностью.

**Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:**

***в научных изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации основных результатов диссертационного исследования:***

1. Гудин, С.В. Правила формирования базы знаний по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепереработки [Электронный ресурс] / С.В. Гудин, Н.Ю. Зуев, Р.Ш. Хабибулин, А.А. Рыженко, Д.Н. Рубцов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4 (56). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/04-04-14.ttb.pdf>.

2. Гудин, С.В. Проблемы управления пожарными рисками на территории объектов нефтепереработки с использованием современных программных продуктов [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин, Д.Н. Рубцов // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 12 (24). – С. 40-45.

3. Гудин, С.В. О структуре и функциях системы снижения пожарных рисков на нефтегазовых объектах [Электронный ресурс] / С. В. Гудин // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2016. – № 6 (70). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/28-06-16.ttb.pdf>.

4. Гудин, С.В. Оценка расчетных величин пожарного риска на территории газораспределительной станции [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин, Д.Н. Рубцов, В.В. Рубцов // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – № 1 (26). – С. 32-42.

5. Гудин, С.В. Модель оптимизации мероприятий для управления пожарными рисками на территории нефтегазовых объектов с использованием генетических алгоритмов [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин // Проблемы анализа риска. – 2017. – № 1 (14). – С. 40-45. , №1, 2017, С. 40-45.

***в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:***

6. Gudini, S. Searching the optimal combination of fire risks reducing measures at oil and gas processing facilities with the use of genetic algorithm. [Текст] / S. Gudini, R. Khabibulin, D. Shikhalev // Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – Porto, Portugal, February 24-26, 2017. – P. 489-496.

***в других научных изданиях:***

7. Гудин, С.В. Генетический алгоритм для задачи оптимизации расположения наружной технологической установки на объекте нефтепереработки с учетом минимизации пожарных рисков [Текст] / С.В. Гудин, Д.В. Шихалев, Р.Ш. Хабибулин // Информатика, управление и системный анализ. Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Тверской государственный технический университет. – 2016. – С. 110-121.

8. Хабибулин, Р.Ш. Многоагентная система адаптивного управления пожарными рисками на производственных объектах нефтегазовой отрасли [Текст] / Р.Ш. Хабибулин, С.В. Гудин // В сборнике: Гибридные и синергети-



ческие интеллектуальные системы Материалы III Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Под редакцией А. В. Колесникова. – 2016. – С. 301-308.

9. Хабибулин, Р.Ш. Система поддержки управления пожарной безопасностью крупных производственных объектов нефтегазовой и нефтехимической отрасли [Текст] / Р.Ш. Хабибулин, С.В. Гудин // В сборнике: Безопасность в техносфере сборник статей. Удмуртское региональное отделение Общероссийской общественной организации «Российское научное общество анализа риска»; ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет». – 2016. – С. 69-73.

10. Гудин, С.В. Поддержка принятия решений в объектно-ориентированной структуре информационной системы управления пожарными рисками [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин // Объектные системы. – 2015. – №11. – С. 63-66.

11. Гудин, С.В. Структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений на базе исследовательской платформы FireRisks [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин // Материалы школы-семинара молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». – Елец, 2014. – С. 206-208.

12. Хабибулин, Р.Ш. Разработка научно-исследовательских компьютерных информационных систем в области управления пожарной безопасностью [Текст] / Р.Ш. Хабибулин, Д.В. Шихалев, О.С. Малютин, С.В. Гудин // Труды XXII Международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – ИПУ РАН, М., 2014. – С. 344-347.

13. Гудин, С.В. Алгоритм управления пожарной безопасностью на нефтегазовых объектах с использованием информационной системы FireRisks [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин // XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Тюмень, 2014. – С. 81.

14. Гудин, С.В. Интеллектуальный модуль для оптимизации решений по снижению пожарных рисков на территории производственных объектов [Текст] / С.В. Гудин, Р.Ш. Хабибулин // Материалы 4-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2015». – М., 2015. – С. 64-66.

15. Гудин, С.В. Классификация мероприятий для управления пожарными рисками на территории производственных объектов. [Текст] / С.В. Гудин // Материалы 5-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016». – М., 2016 – С. 125-130.

***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:***

16. Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014616826. Геоинформационная исследовательская web-система управления пожарными рисками на производственных

объектах «FireRisks». Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 4 июля 2014 г.

17. Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2166633115. Программа оптимизации расположения нового технологического аппарата на территории нефтеперерабатывающих объектов с использованием генетических алгоритмов. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.12.2016 г.

18. Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №216663639. Программа оптимизации комбинации мероприятий для управления пожарными рисками на территории нефтегазовых объектов с использованием генетических алгоритмов. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2016 г.

---

Подписано в печать 23.10.2017 г.  
Тираж 100 экз.

Формат бумаги 60x90 1/16  
Заказ № 698

---

Академия ГПС МЧС России  
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.