

На правах рукописи

КАБАНОВ Евгений Игоревич



**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ И
ПРОГНОЗА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА
ТРАВМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ
ВЗРЫВАХ МЕТАНА И ПЫЛИ**

*Специальность 05.26.01 – Охрана труда (в горной
промышленности)*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Коришунов Геннадий Иванович

Официальные оппоненты:

Шевченко Леонид Андреевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра аэрологии, охраны труда и природы, заведующий кафедрой

Баловцев Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт, кафедра «Безопасность и экология горного производства», доцент

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита диссертации состоится 28 ноября 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.09 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru
Автореферат разослан 27 сентября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФОМИН
Сергей Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Добыча угля на шахтах России происходит в условиях повышения нагрузок на очистные забои и перехода горных работ на более глубокие горизонты. Это приводит к увеличению газообильности подземных выработок и росту потенциальной опасности травмирования персонала при взрывах метана и пыли. Для своевременного принятия мер по предотвращению несчастных случаев и обеспечения безопасности ведения работ на угольных шахтах, в настоящее время осуществляется развитие риск-ориентированного подхода, в основе которого используется принцип оценки и прогноза профессиональных рисков. В частности, действующие требования к системе управления промышленной безопасностью и охраной труда регламентируют выполнение оценки профессиональных рисков на угольных шахтах.

Для решения задачи оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли необходимо использование метода, позволяющего производить определение показателей риска с учетом комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов. В работах Н.М. Качурина, В.С. Забурдяева, В.Б. Артемьева, Г.И. Коршунова, А.Н. Домрачева, Г.В. Стась, А.Г. Бабенко, А.И. Костокрызова, А.И. Гражданкина, С.В. Баловцева, F.T. Kissel, L.A. Pejic, R.L. Grayson, L. Shi, R. Mevsim, I.L. Cioca, N. Qifeng, H. Wang, A.S. Markowski и других рассмотрено влияние отдельных факторов на риск взрывов метана и пыли. В тоже время вопрос методического обеспечения оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли в условиях информационной неопределенности исходных данных с учетом взаимодействия комплекса факторов остается нерешенным, что подтверждает актуальность темы исследований.

Цель работы. Повышение безопасности труда персонала угольных шахт на основе оценки и прогноза профессионального риска травмирования при взрывах метана и пыли.

Основные задачи исследований:

1. Анализ нормативно-методической базы в области оценки и прогноза профессиональных рисков на опасных производственных объектах угольной промышленности.

2. Исследование профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Статистический анализ влияния факторов, характеризующих условия эксплуатации угольных шахт, на показатели индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

3. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики для расчета численных показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли.

4. Обоснование и разработка метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли. Разработка рекомендаций по организации системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах.

Идея работы. Определение уровня профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли на угольных шахтах в условиях информационной неопределенности должно осуществляться с использованием модели экспертной системы на основе нечеткой логики, позволяющей выполнять прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон с учетом влияния комплекса факторов.

Научная новизна:

- установлены зависимости индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метанопылевоздушных смесей от газовентиляционных параметров выемочных участков с учетом эффективности мероприятий газового и пылевого режима при среднемесячной производительности труда более 210 т/чел.;

- на основе модели экспертной системы нечеткого вывода установлены связи между численным показателем профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли и показателями горно-геологических,

горнотехнических, субъективных и организационных факторов с учетом их взаимодействия.

Основные защищаемые положения:

1. Ранжирование угольных шахт по прогнозируемому уровню индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана следует производить на основе результатов количественной оценки с использованием многофакторной регрессионной модели, учитывающей связи между частотой поражения персонала при взрывах и относительной газообильностью шахты, склонностью отработываемых пластов к самовозгоранию и системой разработки.

2. Численный показатель профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли в подземных выработках угольной шахты в условиях информационной неопределенности следует оценивать с использованием модели экспертной системы на основе нечеткой логики, учитывающей влияние комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов.

3. Выбор и обоснование превентивных организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма должны осуществляться с использованием адресного подхода, учитывающего результаты комплексной оценки профессионального риска и прогноза опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрывов метана и пыли.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использован комплексный метод, включающий: аналитическое исследование теории и практики оценки профессиональных рисков на угольных шахтах; системный анализ профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли; использование компьютерных программ статистической обработки данных; логико-графический анализ и структуризацию факторов риска и факторов защиты; компьютерное моделирование с использованием методов теории нечетких множеств; структурированное объектно-ориентированное программирование в среде Delphi XE.

Достоверность результатов исследований подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов и статистических наблюдений; обоснованным использованием методов математической статистики и специализированных компьютерных программ для математической обработки данных; апробацией на действующих угольных шахтах рекомендаций, вошедших в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017).

Практическая ценность работы:

- сформирована экспертная система нечеткого вывода для поддержки принятия решений в условиях информационной неопределенности по выбору организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня производственного травматизма при взрывах метана и пыли;

- разработан программный комплекс расчета показателей профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, позволяющий производить анализ сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий;

- обоснован и разработан метод комплексной оценки профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, позволяющий производить прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон в подземных выработках угольных шахт;

- разработаны рекомендации по оценке рисков, вошедшие в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017).

Реализация результатов работы. Разработанные методические рекомендации вошли в заключительный отчет о научно-исследовательской работе «Разработка научно обоснованных предложений по оценке рисков аварий на угольных шахтах с учетом конкретных горно-геологических условий» (договор с Минэнерго России 16/0411.3070390019.241/11/218) и Руководство по безопасности «Методические рекомендации по

проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017), защищены патентом на изобретение «Способ оценки риска взрывов метана и пыли в шахтах».

Личный вклад автора. Сформулированы цель, идея и задачи исследований; выполнен анализ нормативно-методической базы в области оценки профессиональных рисков на опасных производственных объектах угольной промышленности; собраны и обработаны материалы технических расследований причин аварий, произошедших на угольных шахтах в 2005-2016 гг.; проведен анализ профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли и на его основе разработан метод комплексной оценки и прогноза численных показателей риска; разработан специализированный программный комплекс расчета показателей профессионального риска; разработаны практические рекомендации по оценке профессиональных рисков и организации системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах; сформулированы основные защищаемые положения и выводы.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на совещании подсекции «Угольная промышленность» секции №5 Научно-технического совета Ростехнадзора (Ростехнадзор, Москва, 2018 г.), Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), VIII конференции Международной горноспасательной организации «IMRB Russia 2017» (г. Новокузнецк, 2017 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), III Международной научно-практической конференции

«Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, 2016 г.), научных семинарах кафедры безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета (2016-2018 гг.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 7 печатных работах, из них 2 – в изданиях Перечня, рекомендуемого ВАК Минобрнауки России, 1 – в издании, индексируемом в базе цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 159 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 27 таблиц, 1 приложение, список литературы из 149 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации представлена общая характеристика угледобывающей отрасли России и рассмотрены перспективы ее развития; произведена оценка условий труда на угольных шахтах России; указаны предпосылки и тенденции применения риск-ориентированного подхода при обеспечении безопасных условий труда на угольных шахтах; проведен анализ методического обеспечения оценки и прогноза профессиональных рисков при подземной добыче угля; сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе диссертации изложены результаты анализа причин и последствий взрывов метана и пыли на угольных шахтах России в 2005-2016 гг. и результаты статистического анализа факторов профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана; выполнен анализ факторов, влияющих на метановыделение в горные выработки угольных шахт из различных источников; выполнена вероятностная оценка травмирования персонала угольных шахт при воздействии воздушных ударных волн взрывов метанопылевоздушных смесей.

В третьей главе диссертации произведен логико-графический анализ профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли; обоснованы принципы построения модели расчета численных показателей

профессионального риска; описан метод учета экспертных оценок и представлены параметры полученной базы продукционных правил нечеткого логического вывода; приведены результаты моделирования экспертной системы на основе нечеткой логики в среде MATLAB.

В четвертой главе диссертации разработан и обоснован метод комплексной оценки профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, позволяющий производить прогноз опасных ситуаций и опасных зон в подземных выработках; представлен программный комплекс расчета показателей профессионального риска; приведены результаты апробации программного комплекса и рекомендации по повышению безопасности труда на угольных шахтах на основе организации системы менеджмента профессиональных рисков.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве следующих защищаемых положений:

1. Ранжирование угольных шахт по прогнозному уровню индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана следует производить на основе результатов количественной оценки с использованием многофакторной регрессионной модели, учитывающей связи между частотой поражения персонала при взрывах и относительной газообильностью шахты, склонностью отрабатываемых пластов к самовозгоранию и системой разработки.

Проведенный анализ условий труда на угольных шахтах России показал, что средний уровень индивидуального риска гибели персонала при взрывах метана и пыли, наблюдаемый в 2005-2016 гг., более чем в два раза превышает среднюю величину допустимого индивидуального риска, установленную для профессиональной сферы деятельности в России на уровне $2,5 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. На отдельных предприятиях данный показатель был превышен более чем в тридцать раз (ш. «Ульяновская», 2007 г. – $9,1 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹; ш. «Северная», 2016 г. – $2,8 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹; ш. «Распадская», 2010 г. – $1,7 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ и др.). Так, в рассматриваемый период взрывы метана и пыли явились основной причиной смертельного травматизма среди персонала угольных шахт, что показано на рисунке 1.

Одним из направлений повышения безопасности труда персонала угольных шахт является реализация риск-ориентированного подхода, заключающегося в оценке и прогнозе профессиональных рисков с целью выявления угледобывающих предприятий и их составных частей, эксплуатируемых в условиях высокого риска, и принятия превентивных мер, направленных на предотвращение случаев травмирования персонала. При этом значительный практический интерес представляет задача обоснования опасности травмирования персонала при взрывах метана и пыли с учетом показателей, характеризующих условия ведения горных работ на конкретных угольных шахтах.

Для выявления зависимостей между показателями угольных шахт и показателями профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, проведен статистический анализ данных о произошедших в 2005-2016 гг. авариях с использованием материалов расследования технических причин аварий и характеристик угледобывающих предприятий, функционирующих в анализируемый период. В ходе анализа сформированы выборки данных, включающие показатели: среднегодовую частоту возникновения взрывов метана и пыли (Q , год⁻¹), индивидуальный риск гибели персонала при взрывах метана и пыли (R , год⁻¹); относительную газообильность (q_1 , м³/т); абсолютную газообильность (q_2 , м³/мин); глубину разработки (h , м); суточную нагрузку на очистной забой (m , т/сут); тип системы разработки (s); способ проветривания (a_1); схему проветривания (a_2); склонность пласта к самовозгоранию (c).

Выявление статистически значимых связей между показателями шахт и показателями риска (Q и R) произведено с расчетом критерия Краскела-Уоллиса (H) и дальнейшим сопоставлением результатов с критическими значениями хи-квадрат (χ^2) при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Выборки с доказанной статистически значимой связью ($H > \chi^2$) группированы с использованием рассматриваемого показателя шахты в качестве группирующей переменной и включают средние по группам значения Q и R (Q_{cp} (год⁻¹) и R_{cp} (год⁻¹) соответственно). Результаты анализа представлены в таблице 1 и на рисунках 2-4.

С учетом влияния показателей с выявленной статистически-значимой связью проведен многофакторный регрессионный анализ, в результате чего получена регрессионная модель расчета прогнозного значения риска взрывов метана ($Q_{cp.n.}$):

$$Q_{cp.n.} = 0,00176q_1 + 0,03362s + 0,02302c - 0,07346. \quad (1)$$

Таблица 1 – Результаты расчета критерия Краскела-Уоллиса

Показатель риска	Критерий	Показатели шахт									
		$Q, \text{год}^{-1}$	$R, \text{год}^{-1}$	$q_1, \text{м}^3/\text{т}$	$q_2, \text{м}^3/\text{мин}$	$h, \text{м}$	$m, \text{т}/\text{сут}$	s	a_1	a_2	c
$Q, \text{год}^{-1}$	H	-	-	18,4	21,1	4,3	5,5	13,8	4,4	2,1	9,1
	χ^2	-	-	15,5	28,9	18,3	16,9	9,5	6,0	7,8	6,0
$R, \text{год}^{-1}$	H	17,9	-	16,9	16,3	2,8	8,1	5,2	0,7	5,4	3,2
	χ^2	14,1	-	15,5	28,9	18,3	16,9	9,5	6,0	7,1	6,0

Апробация полученной многофакторной регрессионной модели (1) с учетом уравнения регрессии $R_{cp} = f(Q_{cp})$ позволило выполнить ранжирование угольных шахт, действующих в 2016 г., по прогнозируемому показателю индивидуального риска ($R_{cp.n.}, \text{год}^{-1}$) с выявлением предприятий, производственная среда которых характеризуется высоким прогнозным значением профессионального риска. При этом обоснование степени опасности выполнено с использованием шкалы допустимости риска: пренебрегаемый риск ($R_{cp.n.} < 10^{-6}, \text{год}^{-1}$), допустимый риск ($10^{-6} \leq R_{cp.n.} \leq 10^{-4}, \text{год}^{-1}$), недопустимый риск ($R > 10^{-4}, \text{год}^{-1}$). Результаты апробации модели представлены на рисунке 5. Сравнение результатов апробации с фактическими показателями аварийности за 2005-2016 гг. свидетельствует о высокой степени сходимости результатов. Разработанная модель позволяет осуществлять прогноз показателей индивидуального риска, которые могут быть использованы в целях количественной оценки, а также в качестве критерия при обосновании опасности угольных шахт по

травмированию персонала при взрывах метана, что обладает высокой практической значимостью при планировании мероприятий, направленных на обеспечение безопасных условий труда.

2. Численный показатель профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли в подземных выработках угольной шахты в условиях информационной неопределенности следует оценивать с использованием модели экспертной системы на основе нечеткой логики, учитывающей влияние комплекса горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов.

Установленные требования к системе управления промышленной безопасностью и охраной труда на угольных шахтах регламентируют проведение оценки профессиональных рисков с учетом различных сценариев возникновения аварий и несчастных случаев, возможных причин образования опасностей и инициирующих событий. Указанные требования могут быть выполнены при проведении оценки и прогноза профессионального риска с использованием модели, учитывающей результаты системного анализа комплекса факторов риска и факторов защиты.

Для определения возможных сценариев травмирования персонала при взрывах метана и пыли и выявления комплекса факторов профессионального риска произведен анализ: актов технического расследования причин аварий, произошедших на угольных шахтах России в 2005-2016 гг. по причинам взрывов метановоздушных, пылевоздушных и метанопылевоздушных смесей (МВС, ПВС и МПВС соотв.); численных моделей прогноза интенсивности выделения метана в воздух выработок и расчета избыточного давления во фронте ударной волны при ее распространении по горным выработкам; пробит-функции для оценки вероятности смертельного травмирования человека при барическом воздействии воздушной ударной волны. По результатам анализа сформирована графическая иерархическая схема в соответствии с методом ВТА (Bow Tie Analysis – анализ «галстук-бабочка»), сокращенный вариант которой представлен на рисунке 6.

При этом использована иерархическая структура «факторы причин → причины → условия → событие → последствия события ← факторы последствий события», включающая комплекс из 31 причины возникновения взрывов МВС/ПВС/МПВС и 58 выявленных горно-геологических, горнотехнических, организационных и субъективных факторов профессионального риска.

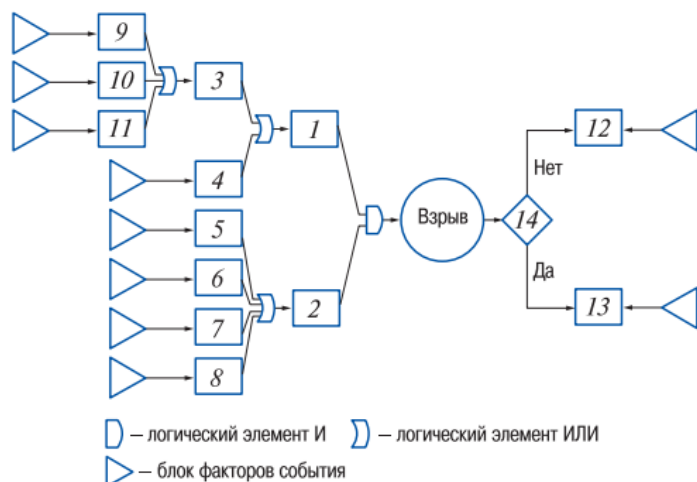


Рисунок 6 – Сокращенная логическая иерархическая схема модели (здесь события: 1 – возникновение взрывоопасной МВС/ПВС/МПВС; 2 – возникновение высокотемпературного источника инициирования; 3 – возникновение взрывоопасной МВС; 4 – возникновение взрывоопасной ПВС; 5 – возникновение очага самовозгорания угля; 6 – возникновение электрического искрового (дугового) разряда; 7 – возникновение импульса при фрикционном трении; 8 – пользование открытым огнем; 9 – обычное выделение метана; 10 – суфлярное выделение метана; 11 – внезапный выброс метана; 12 – смертельное травмирование персонала при первичном взрыве МВС, ПВС, МПВС; 13 – смертельное травмирование персонала при вторичном взрыве ПВС; 14 – возникновение вторичного взрыва ПВС).

В существующих условиях информационной неопределенности исходных данных затруднительна реализация

вероятностно-статистических методов анализа связей в сформированной иерархической структуре. В связи с чем, при разработке модели использован метод экспертной оценки с представлением результатов в виде нечетких множеств, что позволило произвести формализацию и объединение оценок группы экспертов, а также выполнить учет неопределенностей. Математический аппарат модели основан на применении алгоритма нечеткого вывода Мамдани, позволяющего производить однократное формирование базы знаний модели экспертной системы и использовать ее в дальнейшем для расчета численных показателей профессионального риска.

Формирование базы знаний модели экспертной системы проведено с учетом количественных зависимостей, а так же оценок квалифицированных экспертов, в результате чего получено 97 лингвистических переменных и 1020 правил нечеткого логического вывода вида:

$$\text{ЕСЛИ } \langle \text{ЛП}_1 = \text{НЧ}_1 \rangle \text{ И } \langle \text{ЛП}_2 = \text{НЧ}_2 \rangle \text{ ТО } \langle \text{ЛП}_3 = \text{НЧ}_3 \rangle (w_1), \quad (2)$$

где $\text{ЛП}_1, \text{ЛП}_2$ – antecedentes лингвистические переменные; ЛП_3 – консеквентная лингвистическая переменная; $\text{НЧ}_1, \text{НЧ}_2, \text{НЧ}_3$ – нечеткие числа, соответствующие $\text{ЛП}_1, \text{ЛП}_2$ и ЛП_3 ; w_1 – весовой коэффициент степени истинности получаемого подзаключения.

Реализация модели экспертной системы произведена в среде математического моделирования MATLAB с использованием пакета прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox. В ходе моделирования установлены поверхности в трехмерных координатах, отображающие взаимодействие факторов в узлах разработанной логической иерархической схемы, что позволило воспроизвести причинно-следственные связи с учетом синергетического эффекта и установить влияние комплекса факторов на показатель профессионального риска. Поверхности, соответствующие основным узлам иерархической структуры модели, представлены на рисунке 7. В ходе моделирования также установлено влияние отдельных факторов на показатель профессионального риска с реализацией принципа «опасность-защита». Так, на рисунке 8 представлены распределения численных значений показателя профессионального риска в зависимости от показателей факторов

(здесь: a – интенсивность выделения метана в выработке, b – уровень соответствия принятых технических решений по вентиляции выработок установленным требованиям, c – уровень трудовой дисциплины, d – уровень обеспеченности выработки воздухом, e – уровень интенсивности выделения пыли, f – уровень организации и выполнения мероприятий по обеспечению безопасности).

Таким образом, разработанная модель экспертной системы позволяет определять численные показатели профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, а также производить анализ различных сценариев и причин травмирования персонала в условиях информационной неопределенности. При этом учитывается комплекс факторов риска и факторов защиты, в том числе возможные отступления от установленных норм и правил безопасности.

3. Выбор и обоснование превентивных организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма должны осуществляться с использованием адресного подхода, учитывающего результаты комплексной оценки профессионального риска и прогноза опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрывов метана и пыли.

Для реализации риск-ориентированного подхода при достижении целей повышения безопасности труда персонала угольных шахт в рамках системы управления промышленной безопасностью и охраной труда необходимо устанавливать приоритет осуществления организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма на основе результатов комплексной оценки и прогноза профессиональных рисков. При оценке профессиональных рисков необходимо рассматривать как штатные условия, так и возможные отклонения в работе, в том числе связанные с авариями на различных составных частях опасного производственного объекта.

Для выполнения указанных требований предложен метод комплексной оценки профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли на основе

модели экспертной системы нечеткого вывода. Для реализации метода разработан алгоритм, позволяющий выполнять прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием поражающих факторов взрывов на горнорабочих, с целью выявления потенциально опасных участков сети подземных выработок и рабочих мест, а также анализа возможных коренных причин травмирования. Алгоритм отражен в патенте на изобретение «Способ оценки риска взрывов метана и пыли в шахтах» (RU 2661508) и включает следующие этапы:

1. Формирование массива данных, описывающего значения показателей анализируемого комплекса факторов в различных точках сети подземных выработок угольной шахты.

2. Выделение выработок (участков выработок) с отличными друг от друга значениями показателей по установленному комплексу факторов.

3. Определение численных показателей профессионального риска с использованием модели экспертной системы нечеткого вывода для всех выработок (участков выработок).

4. Оценка показателей профессионального риска путем их сравнения с установленными в ходе экспертной оценки уровнями допустимости риска.

5. Определение превалирующих сценариев возникновения неблагоприятных событий по результатам оценки профессионального риска и определение коренных причин их возникновения.

Таким образом, при использовании разработанного метода достигается необходимый для реализации риск-ориентированного подхода уровень информационного обеспечения, а также выполняются установленные требования к оценке и прогнозу профессиональных рисков, что позволяет осуществить адресный подход при выборе и реализации мероприятий, направленных на повышение безопасности труда персонала угольных шахт.

Для автоматизации расчета численных показателей профессионального риска в рамках разработанного алгоритма и обеспечения возможности использования метода в реальных условиях производства, установленные при моделировании связи

использованы для создания специализированной информационной системы в среде разработки Embarcadero Delphi 10.1. В результате получен программный комплекс расчета показателей риска (ПКРПР), позволяющий проводить экспресс-оценку профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли с осуществлением анализа возможных сценариев и причин возникновения неблагоприятных событий. Интерфейс ПКРПР представлен на рисунке 9. ПКРПР апробирован с использованием данных технического расследования несчастных случаев, произошедших на угольных шахтах России. Полученные результаты свидетельствуют о возможности преодоления недостатков существующих методов оценки профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли, а также реализации адресного подхода для обоснования превентивных организационно-технических мероприятий, направленных на снижение уровня производственного травматизма.

Разработанный метод может быть использован в качестве инструмента, позволяющего проводить анализ, оценку и прогноз профессиональных рисков с целью предоставления информации для принятия управленческих решений в рамках функционирования системы менеджмента профессиональных рисков. Вместе с тем, становятся возможным применение процессного подхода к управлению рисками и реализация механизмов априорного анализа производственной среды угольных шахт. Что позволяет интегрировать систему менеджмента профессиональных рисков в общую структуру системы управления и обеспечить планирование мероприятий по повышению безопасности труда на угольной шахте в рамках скоординированной деятельности организации по управлению профессиональными рисками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. В результате анализа индивидуального риска гибели персонала угольных шахт за период 2004-2016 гг. установлено первостепенное влияние опасных факторов взрывов метана и пыли на отраслевые показатели смертельного травматизма. Показано, что

минимизация профессиональных рисков травмирования персонала при взрывах метана и пыли в современных условиях возможна при применении риск-ориентированного подхода, осуществляемого с использованием метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска.

2. При проведении анализа данных о произошедших в 2005-2016 гг. взрывах метана установлены статистически-значимые связи между показателем индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метанопылевоздушных смесей и относительной газообильностью шахты, системой разработки и склонностью пластов к самовозгоранию. Разработанная с учетом выявленных зависимостей многофакторная регрессионная модель позволяет определять прогнозные значения индивидуального риска травмирования персонала при взрывах метана и выполнять ранжирование и выявление угольных шахт, производственная среда которых характеризуется высоким значением профессионального риска.

3. Разработана модель нечеткого логического вывода для расчета численных показателей профессионального риска, основанная на результатах совместного использования количественных зависимостей и экспертных оценок, и позволяющая производить комплексную оценку и прогноз профессионального риска в условиях информационной неопределенности исходных данных. Разработаны рекомендации по анализу рисков, вошедшие в Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора № 192 от 05.06.2017).

4. В ходе реализации модели в среде математического моделирования MATLAB получены поверхности функций нечетких переменных в трехмерных координатах, отображающие совместное воздействие факторов на профессиональный риск. Также установлено значительное влияние организационно-технических факторов, позволяющее производить учет отклонений от требований безопасности при расчете численных показателей профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли.

5. Обоснован и разработан метод, позволяющий выполнять требования, предъявляемые к системе управления промышленной безопасностью и охраной труда в части комплексной оценки профессионального риска, а также осуществлять прогнозирование опасных ситуаций и опасных зон, обусловленных воздействием на работающих поражающих факторов взрывов метана и пыли.

6. На основе результатов моделирования создан программный комплекс расчета показателей профессионального риска, позволяющий производить комплексную экспресс-оценку профессионального риска травмирования персонала при взрывах метана и пыли, выполнять анализ сценариев возникновения неблагоприятных событий, осуществлять адресный подход при выборе и обосновании превентивных организационно-технических мероприятий по снижению уровня производственного травматизма.

7. Приведены рекомендации по использованию разработанного методического подхода для повышения эффективности системы менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах с целью снижения уровня производственного травматизма.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки России:

1. Кабанов, Е.И. Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли / С.В. Мясников, Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 5. – С. 60-65.

2. Кабанов, Е.И. Разработка методики оценки рисков аварий на угольных шахтах с учетом конкретных горно-геологических условий / Г.И. Коршунов, О.И. Казанин, М.Л. Рудаков, А.О. Недосекин, Е.И. Кабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. - № 4. – С. 374-383.

В изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus:

3. Kabanov, E.I. The use of a risk-based approach in safety issues of coal mines / G.I. Korshunov, M.L. Rudakov, E.I. Kabanov // Journal

of Environmental Management and Tourism. – 2018. – Vol. IX (Spring), 1(25). – P. 181-186.

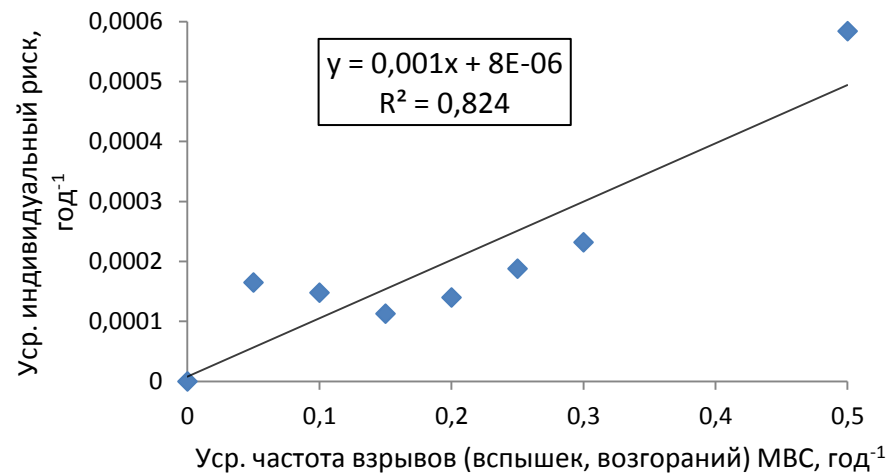
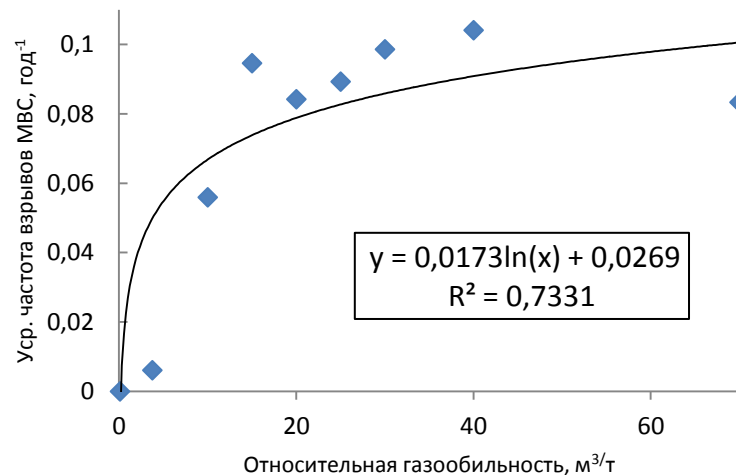
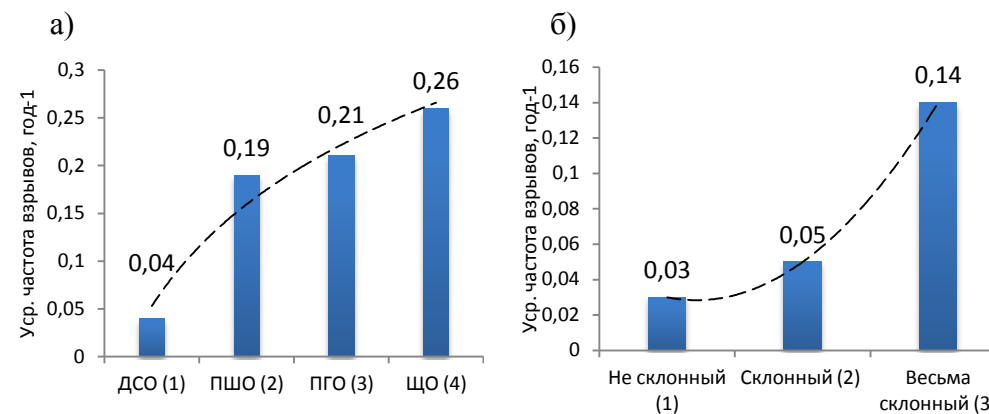
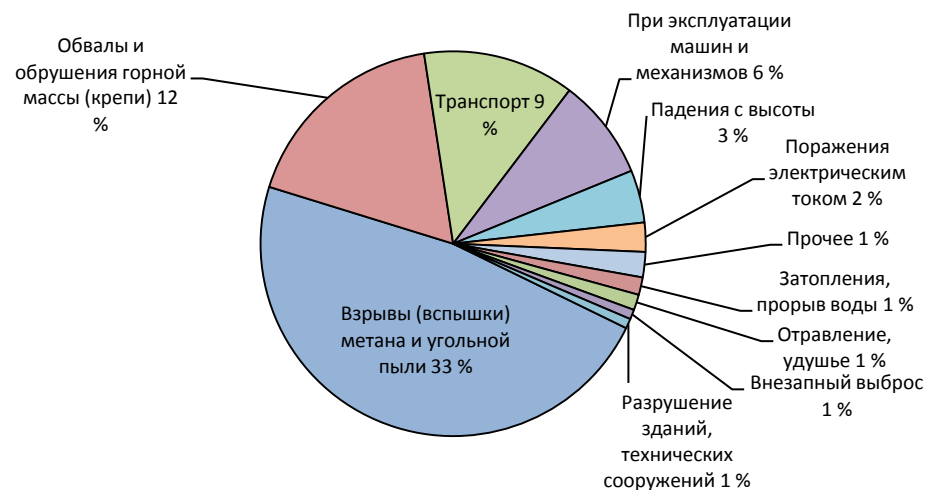
В прочих изданиях:

4. Кабанов, Е.И. Использование модели нечеткого вывода при организации менеджмента профессиональных рисков на угольных шахтах / Е.И. Кабанов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 6-1(21). – С. 400-402.

5. Кабанов, Е.И. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики для проведения оценки риска взрывов метана и пыли на угольных шахтах / Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, Л.В. Пихконен, В.А. Родионов // Международная горноспасательная конференция «IMRB – 2017», Новокузнецк, 4-7 сентября 2017.: Сборник тезисов. – Новокузнецк, – 2017. – С. 64-65.

6. Кабанов, Е.И. Исследование факторов риска взрывов метана и пыли в угольных шахтах на основе анализа статистических данных / Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов // Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г.: Сборник тезисов / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., – 2017. – С. 104-105.

7. Кабанов, Е.И. Оценка риска взрывов метана на угольных шахтах России / Е.И. Кабанов // Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 19-21 апреля 2017 г.: Сборник научных трудов. Часть II / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., – 2017. – С. 31.



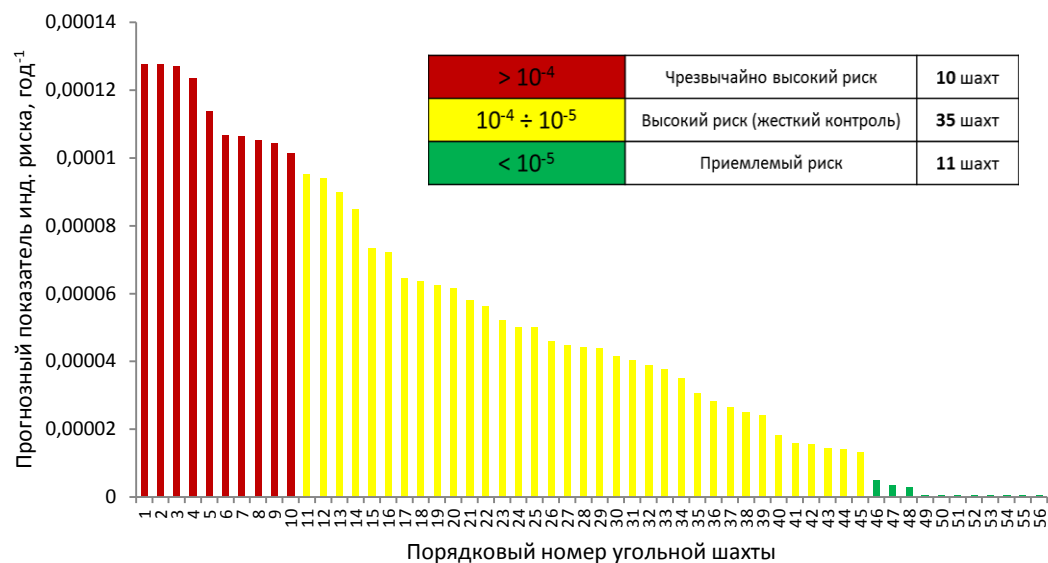


Рисунок 5 – Результаты оценки прогнозного показателя индивидуального риска смертельного травмирования персонала при взрывах метана на угольных шахтах России

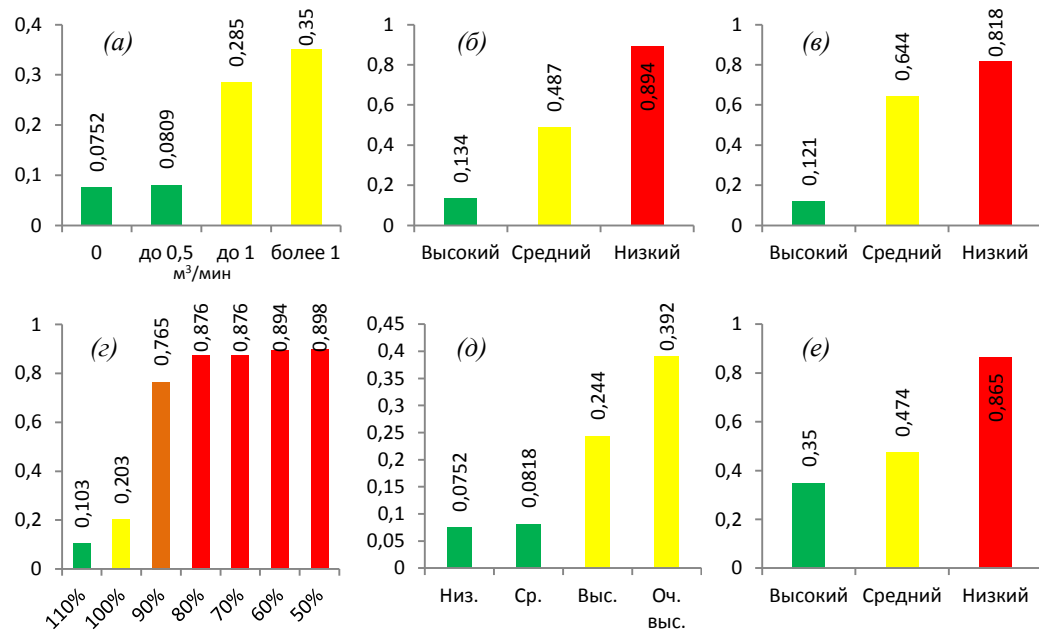


Рисунок 8 – Влияние основных факторов на показатель профессионального риска

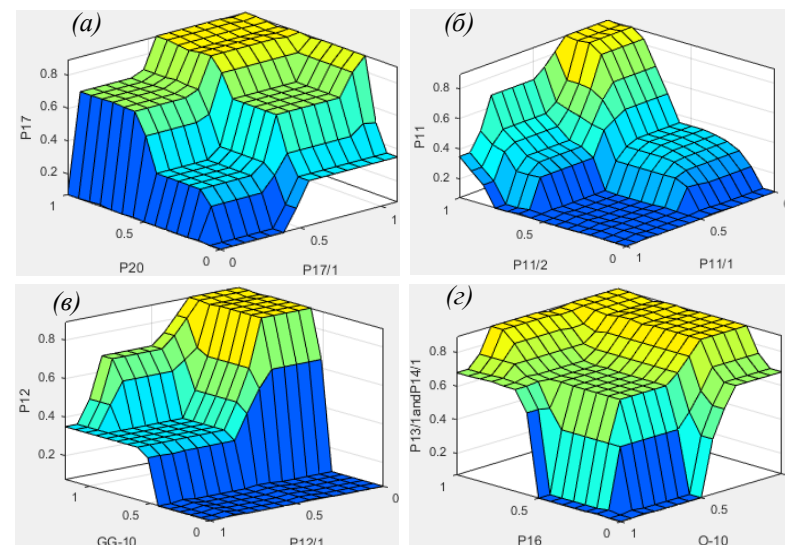


Рисунок 7 – Влияние пар переменных на показатели риска (а – риск образования взрывоопасной МВС, б – риск образования взрывоопасной ПВС, в – риск самовозгорания угля, г – риск образования электрического разряда)

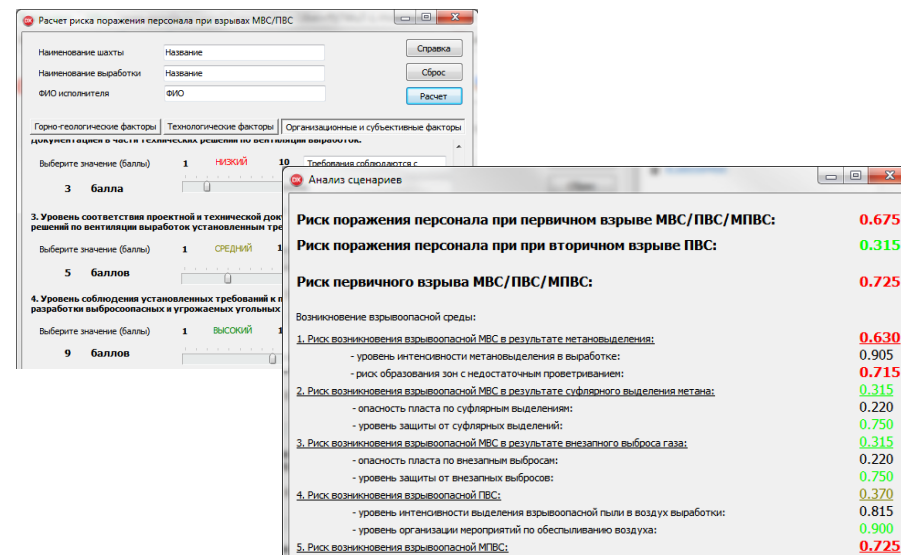


Рисунок 9 – Интерфейс ПКРПР