

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

БАЛОВЦЕВ Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ
АЭРОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор **Скопинцева Ольга Васильевна**

Москва 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В утвержденной в 2020 г. программе развития угольной промышленности России до 2035 г. предусмотрен рост добычи угля в стране к 2030 г. до 476 млн т в консервативном сценарии и до 659 млн т – в оптимистичном. Основными ориентирами энергетической стратегии России на период до 2035 года должны стать энергетическая безопасность, экономическая эффективность и устойчивое развитие энергетики.

Рост концентрации и интенсификации производственных процессов при подземной добыче угля за счет применения высокопроизводительной техники и технологий сопровождается постоянным увеличением глубины горных работ, приводящим к учащению проявлений природных опасностей в шахтах, среди которых особое место по катастрофичности последствий и экономическому ущербу занимают газовая и пылевая опасности, пожары, внезапные выбросы угля и газа. Масштабные катастрофы в высокопроизводительных угольных шахтах за последние годы в результате взрывов метанопылевоздушных смесей привели к необходимости включения в существующую концепцию обеспечения взрывобезопасности горных работ риск-ориентированного подхода к обеспечению аэрологической безопасности, особенно на шахтах, отработывающих высокогазоносные угольные пласты, опасные по взрывам пыли.

В решении проблемы обеспечения аэрологической безопасности таких шахт остаются неопределенными взаимозависимости влияния факторов природных опасностей и системных технико-технологических факторов горного производства (нагрузок на очистной забой, абсолютной газообильности шахт и участков, скоростей подвигания очистных и подготовительных забоев и др.) на закономерности возникновения аэрологических рисков на выемочных участках, в подготовительных выработках, в крыльях шахты и шахты в целом.

В связи с вышеизложенным проблема повышения аэрологической безопасности угольных шахт путем комплексной оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков аварий, соответствующих уровням иерархической структуры шахты, является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Целью работы является разработка методологии оценки, прогноза и снижения аэрологических рисков аварий путем ранжирования рисков по уровням иерархии технологической структуры шахты, основанной на

вероятностно-аналитическом подходе к оценке рисков, позволяющем оценить эффективность технических мероприятий, направленных на повышение уровня безопасности ведения горных работ, и выбрать оптимальную стратегию их практической реализации.

Идея работы состоит в том, что для оценки аэрологических рисков используются показатели реализации аварий и экспертные оценки опасности горно-геологических и технологических условий угледобычи и уязвимости схем и способов вентиляции объектов всех уровней технологической иерархии шахты в зависимости от их аэродинамических параметров.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

1. Всю совокупность аэрологических рисков аварий в угольных шахтах можно представить как декомпозированную систему аэрологических рисков трех рангов (I, II, III). Аэрологические риски I ранга охватывают всю шахту, аэрологические риски II ранга охватывают пласты, крылья, залежи; аэрологические риски III ранга охватывают отдельные добычные или подготовительные участки. При этом отдельные виды рисков занимают строго определенные места в иерархической структуре аэрологических рисков аварий в угольной шахте.

2. Оценка аэрологического риска аварий I, II, III рангов включает фоновую составляющую, зависящую от природных характеристик разрабатываемых пластов, определяемую с учетом газоносности, фильтрационно-коллекторских свойств, пылеобразующей способности, прочностных характеристик пласта, вмещающих пород и наличия тяжелых углеводородов в остаточных газах углей и угольной пыли, и системную составляющую, определяемую технологическими параметрами системы, зависящими от газообильности, нагрузки на очистной забой, скорости подвигания лавы и подготовительного забоя, от уязвимости схемы проветривания выемочного участка, подготовительной выработки, крыла шахты и шахты в целом).

3. Для шахт 3-ей категории и выше рассчитывается обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска на выемочных участках, учитывающий влияние на риск таких факторов, как склонность угольных пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение различных способов управления метановыделением, что позволит количественно оценить эффективность технологических мероприятий и выбрать оптимальную стратегию по снижению аэрологического риска на выемочном участке.

4. Алгоритмическое обеспечение расчетов по оценке и снижению аэрологических рисков аварий на выемочных участках, в подготовительных выработках, пластах, горизонтах или крыльях шахт и на шахтах в целом основывается на внешней и внутренней иерархических структурах аэрологического риска; внешняя структура I, II, III рангов соответствует технологической функциональной структуре шахты; внутренняя иерархическая структура рисков каждого ранга представляет собой открытый граф («дерево отказов»), учитывающий причинно-следственные связи горнотехнических, горно-геологических и организационных факторов, приводящих к отказам вентиляции объектов ранга.

5. Ранжирование угольных шахт по I, II, III рангам аэрологических рисков и дифференцированная оценка аэрологического риска по дополнительным факторам опасности аварий на выемочных участках, таким, как риск взрыва метана и угольной пыли, риск загазирования, риск влияния тяжелых углеводородов, риск влияния повторного использования выработок, позволяет выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты на основе расчета обобщенного показателя прогнозного значения аэрологического риска определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

соответствием методологии управления аэрологическими рисками в угольных шахтах принципам моделирования сложных систем;

применением апробированного вероятностно-аналитического метода для нахождения функции состояния вентиляционной системы шахты и отдельных ее подсистем;

достаточным объемом и представительностью статистической выборки, высокими значениями показателей тесноты статистической связи в полученных уравнениях регрессии (коэффициент корреляции не ниже 0,9);

высокими значениями коэффициента конкордации ($W=0,69-0,78$) при оценке согласия мнений экспертов в установлении коэффициентов значимости показателей опасности горно-геологических и горнотехнических факторов и уязвимости схем и способов вентиляции.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методология оценки и снижения аэрологических рисков в угольных шахтах, основанная на ранжировании угольных шахт по I, II, III рангам аэрологических рисков и дифференцированная оценка аэрологического риска по дополнительным факторам опасности аварий на выемочных участках;
- впервые получена классификация рисков по их рангам и видам, позволяющая осуществлять управление безопасностью шахты по уровням ее технологической иерархии как сверху вниз, так и снизу вверх;
- установлены критерии опасности горно-геологических и горнотехнических факторов и уязвимости схем и способов вентиляции на уровне выемочных участков, подготовительных выработок, крыльев шахты и шахты в целом;
- обоснован метод оценки аэрологических рисков, основанный на полученных зависимостях аэрологического риска от газообильности выемочного участка и пылеобразующей способности угольного пласта, включающий оценку рисков аварий на выемочных участках, в подготовительных выработках, в крыльях шахты и в шахте в целом, оценку рисков аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска, оценку риска загазирования участка, риска загазирования при повторном использовании выработок (применение метода позволит повысить безопасность угольных шахт).

Научное значение работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании методологии оценки, прогноза и снижения аэрологических рисков аварий путем декомпозиции рисков по иерархическим уровням, включающим риски аварий, оцениваемым на основе установленных зависимостей реализации рисков, связанных с газообильностью очистного забоя, взрывчатостью угольной пыли, содержанием тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов и отложившейся пыли, пылеобразующей способности разрабатываемого пласта и степени уязвимости схемы вентиляции участка, подготовительной выработки, крыла шахты и шахты в целом, что позволит предотвратить и минимизировать последствия чрезвычайных ситуаций на высокогазобильных угольных шахтах, разрабатывающих пласты, опасные по взрывам пыли.

Практическая значимость исследований – на основе полученных результатов разработана инженерная методика прогноза и снижения аэрологических рисков, которая может использоваться как при проектировании

новых предприятий, так и для текущего планирования развития горных работ на действующих шахтах. Ранжирование шахт и их технологических участков в зависимости от аэрологических рисков позволяет выявлять шахты и их элементы с низким уровнем аэрологической безопасности и на основе расчета обобщенного показателя прогнозного значения аэрологического риска с высокой избирательностью управлять рисками аварий путем разработки соответствующих технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Реализация работы. Результаты исследований и рекомендации использованы при: разработке технических решений по повышению аэрологической безопасности угольных шахт, оценке влияния принимаемых технических решений на степень аэрологических рисков на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс»; оценке аэрологической безопасности действующих угольных шахт, проводимой Автономной некоммерческой организацией дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности»; разработке обоснования безопасности угольных шахт ООО Проектная Группа «ПРОМЭКС»; реализации программ дополнительного профессионального образования ООО «Группа компаний Безопасность».

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» (2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2024); на научных семинарах кафедры «Безопасность, и экология горного производства» (НИТУ МИСИС, 2014 – 2024 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 31 научная работа (в том числе 29 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, из которых 17 в изданиях, индексируемых в Scopus).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения; содержит 47 таблиц, 35 рисунков, список литературы из 256 наименований и 2 приложения.

Автор выражает благодарность научному консультанту д.т.н., проф. О.В. Скопинцевой, зав. каф. «Безопасность и экология горного производства», д.т.н., проф. К.С. Коликову, д.т.н., проф. Н.О. Калединой; проректору, д.т.н., проф. Петрову В.Л., д.т.н., проф. Е.Ю. Куликовой, начальнику отдела организации надзорных мероприятий Ростехнадзора Т.В. Стульской и всем сотрудникам кафедр «Безопасность и экология горного производства» и «Техносферная безопасность» за содействие при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

За последние годы на высокопроизводительных шахтах России происходили катастрофические взрывы метана и угольной пыли, сопровождавшиеся экзогенными пожарами: шахта им. Шевякова (Кузбасс, 1992 г.), «Воркутинская» (Печорский бассейн, 1995 г.), «Баренцбург» (о. Шпицберген, 1996 г.), «Зырянская» (Кузбасс, 1997 г.), «Центральная» (Печорский бассейн, 1998 г.), «Юбилейная» (Кузбасс, 2007 г.), «Ульяновская» (Кузбасс, 2007 г.), «Распадская» (Кузбасс, 2010 г.), «Северная» (Печорский бассейн, 2016 г.), «Листвяжная» (Кузбасс, 2021 г.) и др. В авариях реализовывалось несколько опасных факторов: газ, пыль и пожар, тогда как в системе профилактики взрывов основной акцент был сделан на метан.

Анализ динамики добычи угля на шахтах Российской Федерации, аварийности и травматизма со смертельным исходом за период с 2001 по 2023 гг. показывает, что добыча угля в среднем возросла за этот период почти в 2 раза, число аварий при этом снизилось в 3,3 раза, количество смертельно травмированных работников уменьшилось в 4,73 раза (рис. 1). При этом, отношение количества максимально травмированных работников в первые 5 лет к среднему их значению за этот период равно 1,37. Аналогичное число за последние 5 лет составляет 2,21, т.е. при общем снижении аварийности и производственного травматизма катастрофические аварии по аэрологическим факторам продолжают происходить с периодичностью один раз в 3-4 года, о чем свидетельствуют пиковые значения смертельно травмированных работников.

Анализ данных (рис. 2) показывает, что по видам аварий в среднем в год происходит 8,4 обрушений пород, 4,17 взрывов метана и угольной пыли, вспышек и воспламенений метана, 0,74 внезапных выбросов угля, породы и газа, горных ударов. При этом процентное распределение по этим видам аварий составляет для: обрушений – 63%; взрывов метана и угольной пыли – 31,4%; внезапных выбросов – 5,6%.

По видам происшедших пожаров в угольных шахтах за последние два десятилетия (рис. 3) частота произошедших экзогенных пожаров составила 41,17%; частота эндогенных пожаров – 58,83%. Суммирование данных рис. 3 и 4 дают следующее распределение причин для: обрушений – 45,7%; взрывов метана и угольной пыли – 20,7%; пожаров – 29,77%; внезапных выбросов – 3,84%.

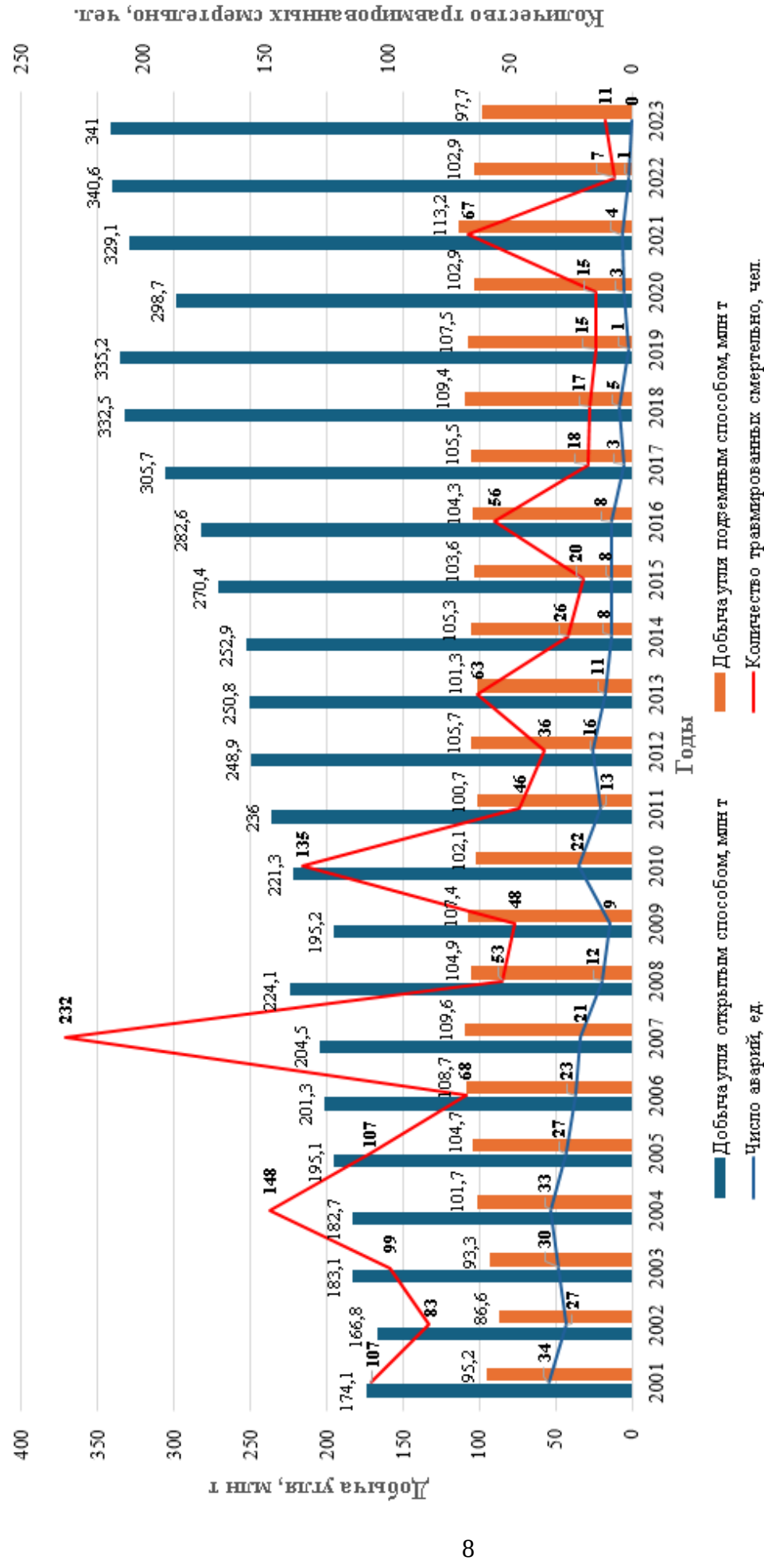


Рисунок 1 – Динамика изменения добычи угля, аварийности и производственного травматизма со смертельным исходом

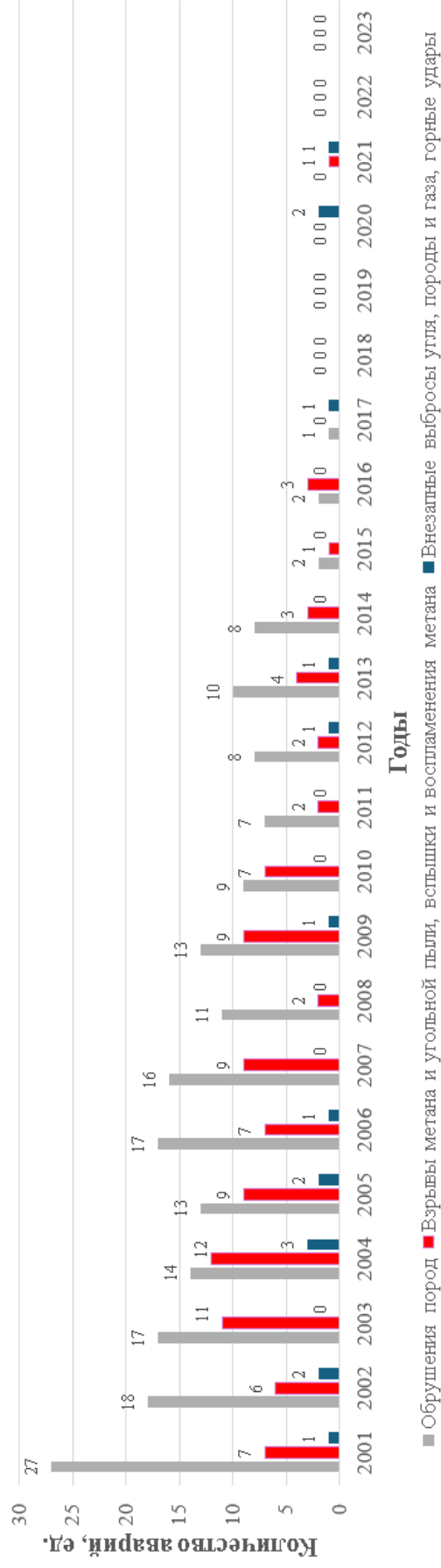


Рисунок 2 – Динамика обрушений пород, взрывов метана и угольной пыли, вспышек и воспламенений метана, внезапных выбросов угля, породы и газа, горных ударов на угольных шахтах

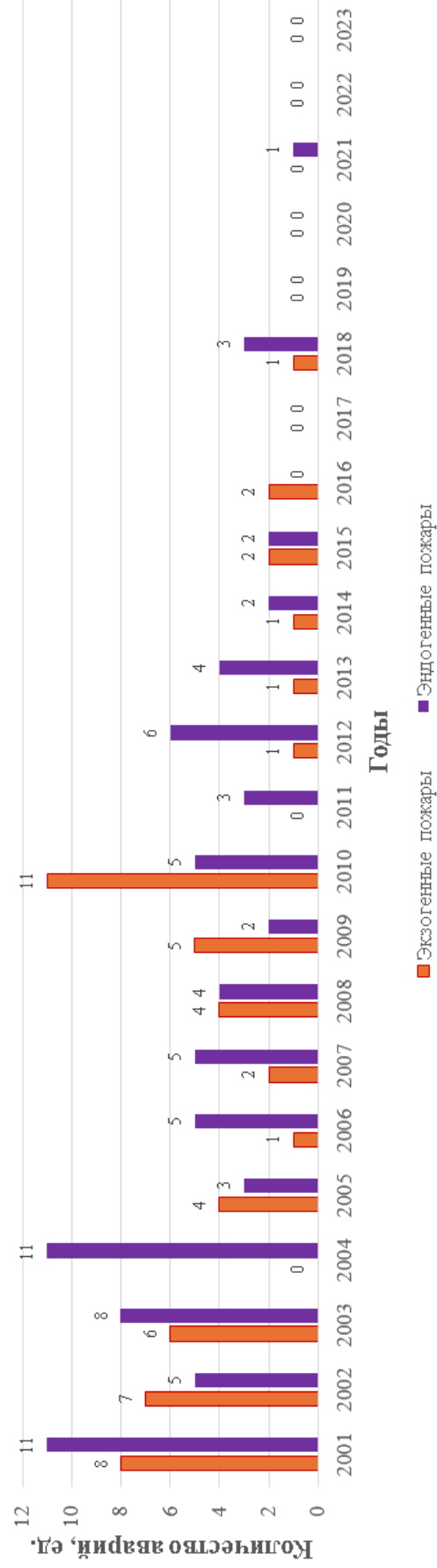


Рисунок 3 – Динамика эндогенных и экзогенных пожаров на угольных шахтах

Основоположником научной школы рудничной аэрологии является выдающийся ученый – академик А.А. Скочинский. В области исследования осредненного движения воздуха в горных выработках можно считать решенными вопросы аэродинамического сопротивления (работы Ф.А. Абрамова, В.Н. Воронина, Л.Д. Ворониной, В.Б. Комарова, А.И. Ксенофоновой, П.И. Мустеля и др.). Процессы диффузии газов в выработках и выработанных пространствах исследовались Ф.А. Абрамовым, А.И. Бобровым, В.А. Бойко, В.Н. Ворониным, Н.О. Калединой, А.И. Ксенофоновой, А.И. Медведевым, И.М. Местером, Л.А. Пучковым, В.В. Скобуновым, Р.Б. Тяном, Н.И. Устиновым, С.С. Кобылкиным, П. Бэкке и др.

Теория и практика исследования фильтрационных движений в шахтах получили достаточно большое развитие в работах Н.М. Качурина, Ф.С. Клебанова, А.Ф. Милетича, М.А. Патрушева, И.М. Печука, К.З. Ушакова, С.Г. Гендлера и др. Решением проблем слоевых скоплений метана занимались А. И. Бобров, А.Л. Сурков, К.З. Ушаков, М.А. Фролов, С.Дж. Лич, Д.С. Тернер, Т. Х. Эллисон и др.

Современные представления о газодинамических процессах в угленосной толще обоснованы и развиты в трудах А.Т. Айруни, С.К. Баймухаметова, Ю.Ф. Васючкова, А.В. Джигрина, В.С. Забурдяева, Г.Д. Лидина, К.С. Коликова, В.Н. Королевой, Е.В. Мазаника, В.А. Малашкиной, Н.Г. Матвиенко, В.В. Мельника, В.И. Мурашова, В.Н. Пузырева, А.Д. Рубана, К.Н. Трубецкого, Н.В. Ножкина, И.В. Сергеева, С.В. Сластунова, Б.Д. Терентьева, В.В. Ходота, И.Л. Эттингера, С.А. Ярунина и др.

Решением проблем борьбы с пылью в угольных шахтах занимались ученые: А.С. Бурчаков, В.Н. Воронин, Л.Д. Воронина, Н.Ф. Гращенков, Г.С. Гродель, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, В.П. Журавлев, Г.С. Забурдяев, И.Г. Ищук, Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, А.С. Кобылкин, А.В. Корнев, Б.Ф. Киринов, В.В. Кудряшов, Л.Я. Лихачев, М.И. Нецепляев, Е.И. Онтин, Г.Е. Панов, А.Е. Пережилов, П.М. Петрухин, С.Н. Подображин, Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко, В.А. Родионов, О.В. Скопинцева, В.В. Ткачев, А.А. Трубицын, А.В. Трубицын, Н.В. Трубицына, М.И. Феськов, М.А. Фролов, М.К. Шуринова, В. Кортней, Л. Манделл, Р. Сальман, В.Дж. Томас и др.

Проблемам обеспечения надежной и эффективной вентиляции шахт посвящены работы А.Т. Айруни, И.И. Босикова, Л.А. Бахвалова, А.С. Бурчакова, А.В. Зайцева, Н.О. Калединой, Н.В. Карнауха, Ф.С. Клебанова, Р.В. Ключева, И.Е.

Колесниченко, А.Г. Лепихова, Н.Г. Матвиенко, М.А. Патрушева, Л.А. Пучкова, О.В. Скопинцевой, Б.Д. Терентьева, Н.И. Устинова, К.З. Ушакова, В.К. Ушакова, А.Э. Филина, В.М. Шека и др.

Вопросы управления риском возникновения травм и аварий рассмотрены в работах В.Б. Артемьева, Н.И. Абрамкина, В.В. Агафонова, П.Г. Белова, С.Н. Гончаренко, А.И. Гражданкина, А.В. Измалкова, Е.А. Колесниченко, Д.С. Конюхова, А.В. Корчака, Е.Ю. Куликовой, Ф.С. Клебанова, В.П. Лавцевича, Г.М. Мутанова, А.С. Оганесян, А.А. Форсюка и других исследователей. Вопросы, связанные с оценкой влияния человеческого фактора, активно исследовались В.П. Баскаковым, В.А. Галкиным, И.Л. Кравчуком, А.К. Логиновым, В.Л. Могилатом, М.А. Котиком, А.В. Фомочкиным, О.В. Виноградовой и др.

Решение проблемы обеспечения аэрологической безопасности на угольных шахтах предполагает выполнение комплекса работ, связанных с анализом и оценкой риска возможных аварий, происходящих вследствие отклонения параметров шахтной атмосферы от нормативных значений. Значительной части аварий удалось бы избежать в случае выявления основных закономерностей между опасностями, приводящими к аварийным ситуациям (на выемочных участках, крыльях шахты и шахты в целом), и своевременного выполнения профилактических мероприятий, направленных на снижение аэрологических рисков.

К настоящему времени не решена проблема оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков по уровням иерархической структуры угольной шахты. Рекомендуемые методики по оценке риска либо носят фрагментарный характер и не могут быть использованы без дополнительных исследований, либо дают усредненные значения, не позволяющие обоснованно выбрать объекты управления риском в технологической структуре конкретной шахты. Как правило, решения в области обеспечения аэрологической безопасности основываются на мнении практиков, а не на научной методологии. Следствием этого является широкое применение схем проветривания выемочных участков, характеризующихся минимальными затратами на обеспечение метанобезопасности и, соответственно, высокой степенью аэрологического риска.

Исходя из анализа общего состояния данных проблем, теоретических и экспериментальных исследований в указанных областях и в соответствии с

поставленной в диссертации целью осуществлялось решение ряда задач, основными из которых являются:

- анализ современного состояния проблемы аэрологической безопасности в угольных шахтах; исследование и оценка взрывоопасности технологических систем угольных шахт;
- исследование закономерностей аэрологических рисков в угольных шахтах; причинно-следственные связи горнотехнических, горно-геологических и организационных факторов при формировании аэрологических рисков; обоснование метода оценки аэрологических рисков;
- разработка методологии оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков в угольных шахтах: критерии опасности и уязвимости вентиляции выемочных участков, подготовительных выработок, крыльев шахт, шахт;
- построение внешней и внутренней иерархических структур аэрологических рисков шахт, крыльев шахт, выемочных участков и подготовительных выработок;
- оценка аэрологических рисков по взрывам метана и угольной пыли, рисков загазирования выработок, рисков повторного использования выработок, рисков влияния тяжелых углеводородов, рисков аэродинамического старения выработок; составление обобщенного показателя прогнозного значения аэрологических рисков шахт;
- разработка метода и методики оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков шахт, крыльев шахт, выемочных участков и подготовительных выработок по взрывам метана и угольной пыли;
- ранжирование угольных шахт по степени аэрологических рисков; разработка рекомендаций по практической реализации метода оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков угольных шахт, разрабатывающих высокогазоносные угольные пласты, опасные по взрывам пыли.

Россия является одним из мировых лидеров по производству и экспорту угля. По итогам 2022 года она обошла по объемам угледобычи Австралию и занимает пятое место в мире, уступая Китаю, Индии, Индонезии и США (на долю России приходится 5,2% объема мировой угледобычи). По объему экспорта угля Россия занимает третье место в мире после Австралии и Индонезии (доля России в мировом угольном экспорте составляет около 16%).

В 2023 году добыча осуществлялась на 54 шахтах. Количество действующих шахт, как технических единиц, снизилось с 1990 г. с 239 до 54 шахт в 2023 г. Подавляющее большинство шахт расположено в Кемеровской области (Кузбасс), что составляет 71% от общего их количества. Резко уменьшилось количество шахт на Дальнем Востоке и Восточной Сибири.

Общий объем добычи угля подземным способом составил 103 млн т, при этом максимальные объемы были достигнуты на шахтах Инаглинская (6,0 млн т), Увальная (5,6 млн т), им. А.Д. Рубана (4,8 млн т), Распадская (4,6 млн т), им. В.Д. Ялевского (4,2 млн т), Северная (Ургалуголь) (4,0 млн т) и других, минимальная добыча – на шахте им. Чиха (195,2 тыс. т), средняя добыча на одну шахту составляет около 2,25 млн т.

Более половины объема угля (57%) добыто на шахтах сверхкатегорных и опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. Наблюдается устойчивая тенденция роста глубины ведения горных работ на шахтах РФ с 432,6 м в 2012 г. до 507 м в 2022 году. В 2022 г. глубина ведения горных работ только на 22 шахтах не превышала 400 м, 12 шахт работали на глубинах свыше 600 м, 2 шахты – более 900 м. Около 50% объемов угля добывается на глубине более 507 м.

Из 331,8 млн т добытого в 2021 г. каменного угля 106,7 млн т относится к коксующимся маркам, более половины из которых (56,1 млн т) добыто подземным способом. В марочной структуре коксующихся углей преобладают высокоценные марки ГЖ, Ж, которые преимущественно добываются на шахтах (более 85%) и относятся к группе спекающихся углей. Также добывается на шахтах значительная доля ценных коксующихся марок КЖ и К – соответственно 76,8 и 33,6%.

Суммарная доля шахт III категории, сверхкатегорных и опасных по внезапным выбросам угля и газа составляет 60,4%. Практически все угольные шахты (96%) являются опасными хотя бы по одному из факторов, при этом 85% шахт опасны по двум и более факторам одновременно: на 41 шахтах одновременно присутствует 3 и более факторов опасности; на 26 из них одновременного свыше 4-х факторов опасности. На 45 шахтах ведется отработка пластов, опасных по взрывчатости пыли.

Вентиляция является основным технологическим фактором создания безопасных условий работы на угольных шахтах. Анализ данных табл. 1 показывает, что наибольшее влияние на взрывоопасность шахт оказывает схема вентиляции выемочного участка: среднее значение показателя взрывоопасности

составляет 1,22; затем следует способ вентиляции шахты со значением показателя 1,17, и затем следует схема вентиляции шахты со значением показателя 0,96.

По способу проветривания угольных шахт (табл. 1) преобладающим по применению остается нагнетательный способ проветривания (63,2%), почти половина всех шахт проветривается по фланговой схеме (48,4%), приоритетной схемой очистных забоев является возвратноточная схема проветривания (41,2%). Пятая часть применяемых установок главного проветривания (21,5%) работают на предельных углах разворота лопаток, 51 установка не имеет резерва по депрессии, 41 – по производительности. Из-за дефицита количества воздуха в 10% случаев имеет место последовательное проветривание подготовительных забоев вместо обособленного.

Таблица 1 – Распределение количества взрывов газа и пыли в угольных шахтах по схемам и способам вентиляции

Распределение шахт по схемам вентиляции				
Схема вентиляции шахты	Количество шахт, %	Количество взрывов, %	Отношение количества взрывов (%) к количеству схем вентиляции (%)	Среднее значение отношения количества взрывов (%) к количеству схем вентиляции (%)
Центральная	22,1	4,7	0,21	0,96
Фланговая	48,4	42,5	0,87	
Комбинированная	29,5	52,9	1,8	
Распределение шахт по способам вентиляции				
Способ вентиляции шахты	Количество шахт, %	Количество взрывов, %	Отношение количества взрывов (%) к количеству способов вентиляции (%)	Среднее значение отношения количества взрывов (%) к количеству способов вентиляции (%)
Нагнетательный	63,2	56%	0,89	1,17
Всасывающий	26,3	27%	1,02	
Комбинированный	10,5	17%	1,6	
Распределение очистных забоев по типам схем проветривания				
Схема проветривания выемочного участка	Количество забоев, %	Количество взрывов, %	Отношение количества взрывов (%) к количеству схем проветривания (%)	Среднее значение отношения количества взрывов (%) к количеству схем проветривания (%)
Возвратноточная	41,2	69,4	1,68	1,22
Комбинированная (возвратноточная в пределах очистного забоя) с применением ГОУ	22,3	29,0	1,3	
Прямоточная	16,9	11,6	0,69	

Наибольшее количество вентиляционных сооружений имеется на шахтах Ростовской области (26%), а также на шахтах Кузбасского и Печорского бассейнов (23%), что отрицательно влияет на обеспечение аэрологической безопасности как в нормальных, так и в аварийных режимах. Дегазация угольных пластов и спутников, как способ управления газовыделением, используется только в 38 забоях (33%), что свидетельствует о крайне низком уровне ее использования. Газоотсасывающие установки применяются только в Кузбассе, при этом за последние десять лет их количество уменьшилось более чем в 2 раза.

При построении методологии обеспечения аэрологической безопасности угольных шахт использован риск-ориентированный подход. Применительно к угольной шахте понятия «опасность» и «риск» относятся к возможным влияниям горно-геологических и горнотехнических факторов на функционирование шахты и ее реакции на эти влияния («уязвимость»). Риск возникает только в области пересечения опасности с объектом. Если такие области пересечения опасности с объектом отсутствуют, то и риски отсутствуют.

По степени последствий реализации аэрологических рисков последние предлагается разделить на три ранга (I, II, III). Аэрологические риски I ранга охватывают всю шахту, аэрологические риски II ранга охватывают пласты, крылья, залежи; аэрологические риски III ранга охватывают отдельные добычные или подготовительные участки. Наиболее опасны риски I ранга, однако вероятность их реализации весьма мала по сравнению с рисками III ранга (взрывы газа и пыли на выемочных участках и в подготовительных выработках), которые являются наиболее распространенными на шахтах.

Математически аэрологический риск выражает вероятностную меру опасности возникновения аварий, реализуемой для схемы вентиляции определенной уязвимости, возникающей из-за неудовлетворительного состава шахтной атмосферы. Наиболее частые виды аварий в угольных шахтах – это взрывы газа и пыли, поэтому газовый и пылевой факторы являются основными видами опасных факторов, сопровождающих угледобычу. Если в рудничном газе, состоящем в основном из метана, содержатся его гомологи, то это создает повышенную газовую опасность вследствие того, что гомологи метана более взрывоопасны по сравнению с метаном, и являются высокотоксичными веществами.

В табл. 3 приведены показатели и критерии опасности горно-геологических факторов, на фоне которых формируются и развиваются аэрологические

риски I, II и III рангов. Это так называемые фоновые факторы риска, которые усугубляются системными факторами аэрологического риска, такими как абсолютная и относительная газообильность шахты (участка), нагрузка на очистной забой, скорость подвигания очистного и подготовительного забоев и др.

Приведенные в табл. 3 виды опасностей могут быть полностью или частично устранены выбором и применением технологических систем, таких как вентиляция, дегазация, газоотсос, газодренаж и т.д., формирующих окончательную величину аэрологического риска, с учетом уязвимости схем и способов вентиляции.

Таблица 3 – Показатели и критерии опасности в структуре аэрологических рисков аварий на угольных шахтах

№ п/п	Показатель опасности	Степень опасности	Значение показателя опасности	Значения критериальных чисел
1.	Относительная метанообильность, м ³ /т; виды выделения метана	I	До 5	При метаноносности пласта ≥ 13 м ³ /т необходимо применять дегазацию
		II	От 5 до 10	
		III	От 10 до 15	
		Сверхкатегорные	>15, суфлярные выделения метана	
		Опасные по внезапным выбросам	Наличие опасности внезапных выбросов угля и газа	
2.	Пылеобразующая способность пласта, удельное пылевыведение г/т	Малопыльные	До 50 (I)	При выходе летучих <15% пыль является невзрывчатой
			50-100 (II)	
		Средней пыльности	100-150 (III)	
			150-250 (IV)	Выход летучих $\geq 15\%$ определяет взрывчатость угольной пыли
		Пыльные	250-400 (V)	
			400-700 (VI)	
		Весьма пыльные	700-1200 (VII)	
			Более 1200 (VIII)	
3.	Наличие тяжелых углеводородов в остаточных газах углей, %	Содержание тяжелых углеводородов C ₃ -C ₆ в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма (марки угля Д, Ж, ОС)	< 20%	Содержание тяжелых углеводородов до 0,001 м ³ /т горючей массы определяет невыбросоопасность пластов
			$\geq 20\%$	Содержание тяжелых углеводородов более 0,001 м ³ /т горючей массы определяет выбросоопасность пластов
4.	Температура горных пород	Геотермическая ступень	Менее 30 м/°С	Температура воздуха в выработках не должна превышать 26°С
			30-70 м/°С	
			Более 70 м/°С	

Иерархическая структура аэрологических рисков создавалась от частного к общему, по принципу снизу вверх: от отдельных объектов шахты до шахты в целом, и укрупненно представлена на рис. 4. Детальная проработка структур I, II и III рангов представлена на рис. 5-7.

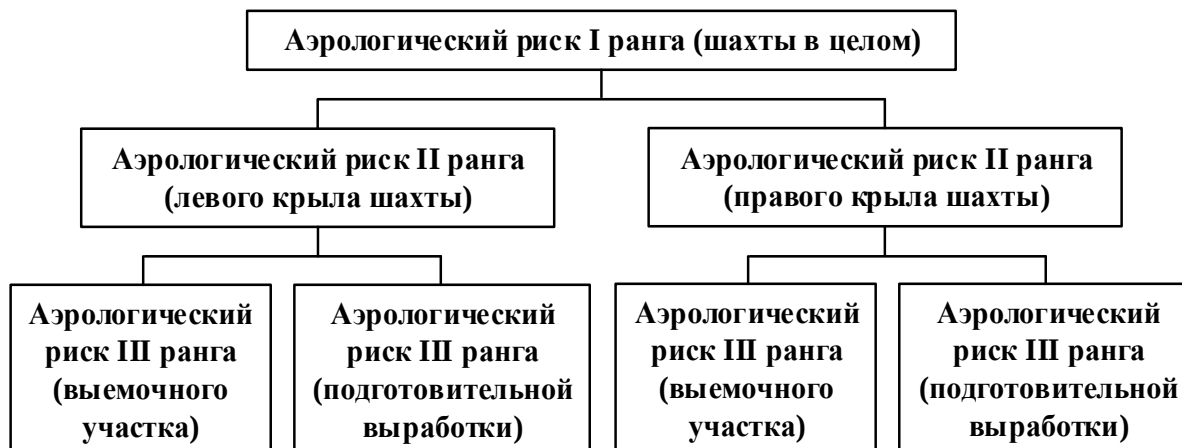


Рисунок 4. – Внешняя иерархическая структура аэрологических рисков угольных шахт

За основу количественной оценки показателей опасности и уязвимости в структуре аэрологического риска всех рангов принят известный подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу.

Оценка аэрологического риска аварий производится на основании экспертного анализа степени опасности горно-геологических и горнотехнических факторов и степени уязвимости системы вентиляции.

Методика оценки и снижения аэрологических рисков аварий в угольных шахтах заключается в установлении взаимосвязей между факторами риска и оценке их влияния на степень аэрологического риска, а также в установлении наиболее уязвимых звеньев в структуре вентиляционных систем шахты, крыла шахты, выемочного участка, подготовительной выработки для разработки технологических, технических, организационно-технических мероприятий.

Аэрологический риск I ранга. Формулы расчета. Показатели опасности и уязвимости в структуре рисков I ранга иерархически увязаны в функциональную систему (рис. 5). Показатели коэффициента опасности возникновения аварии для шахты в зависимости от установленного кода показателей опасности приведены в табл. 4, показатели уязвимости – в табл. 5.

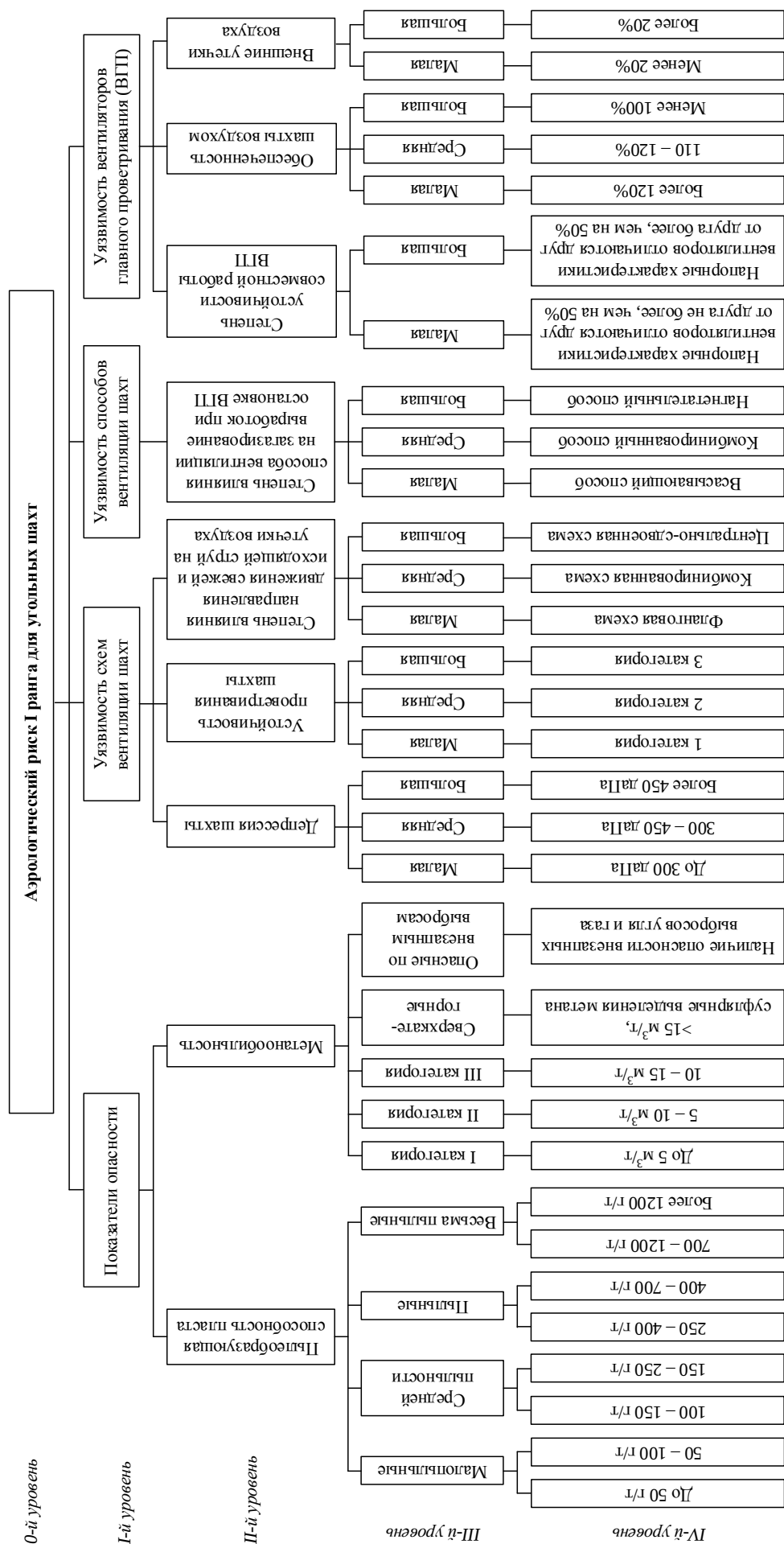


Рисунок 5. Иерархическая структура аэрологического риска I ранга

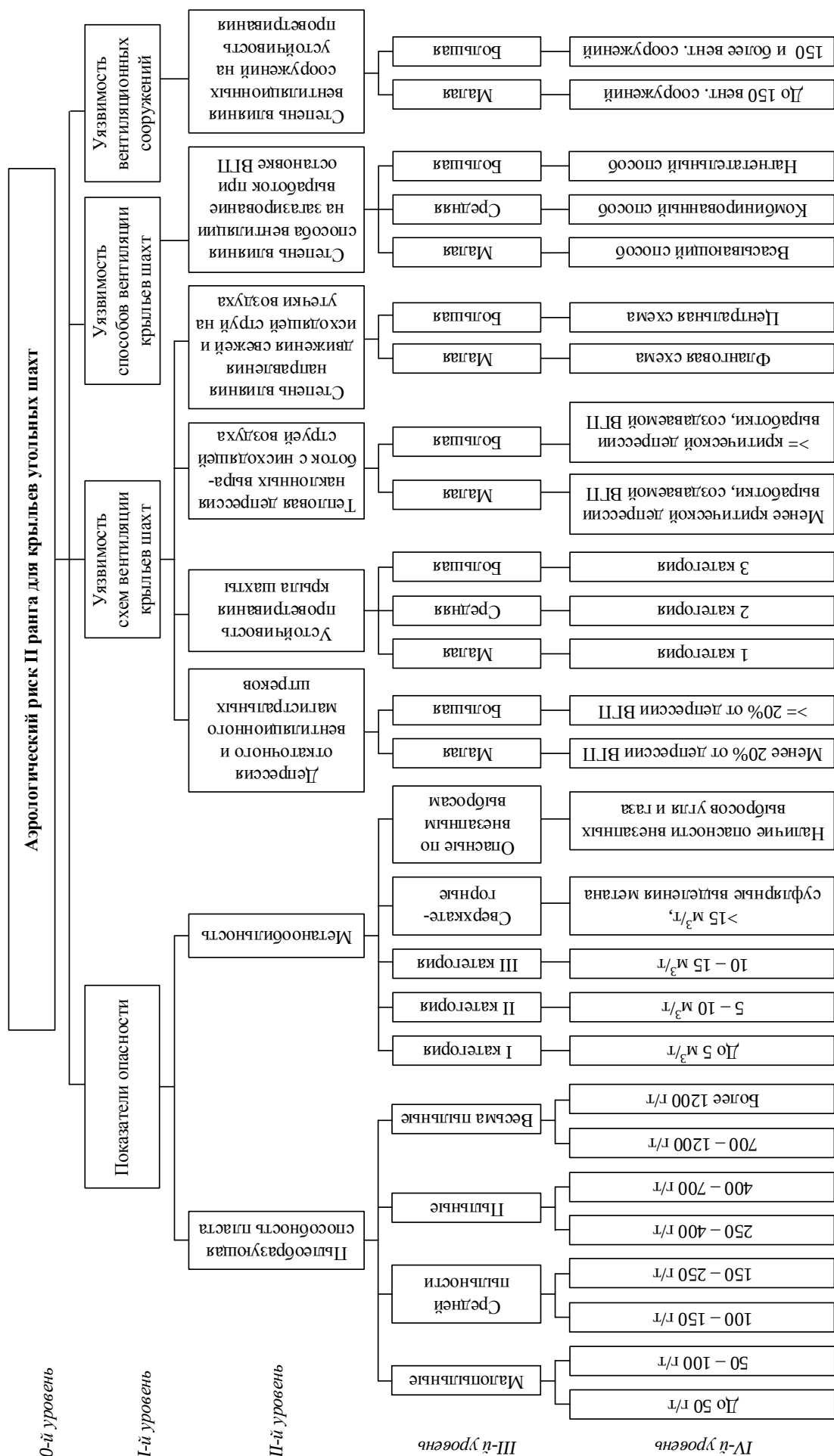


Рисунок 6. Иерархическая структура аэрологического риска II ранга

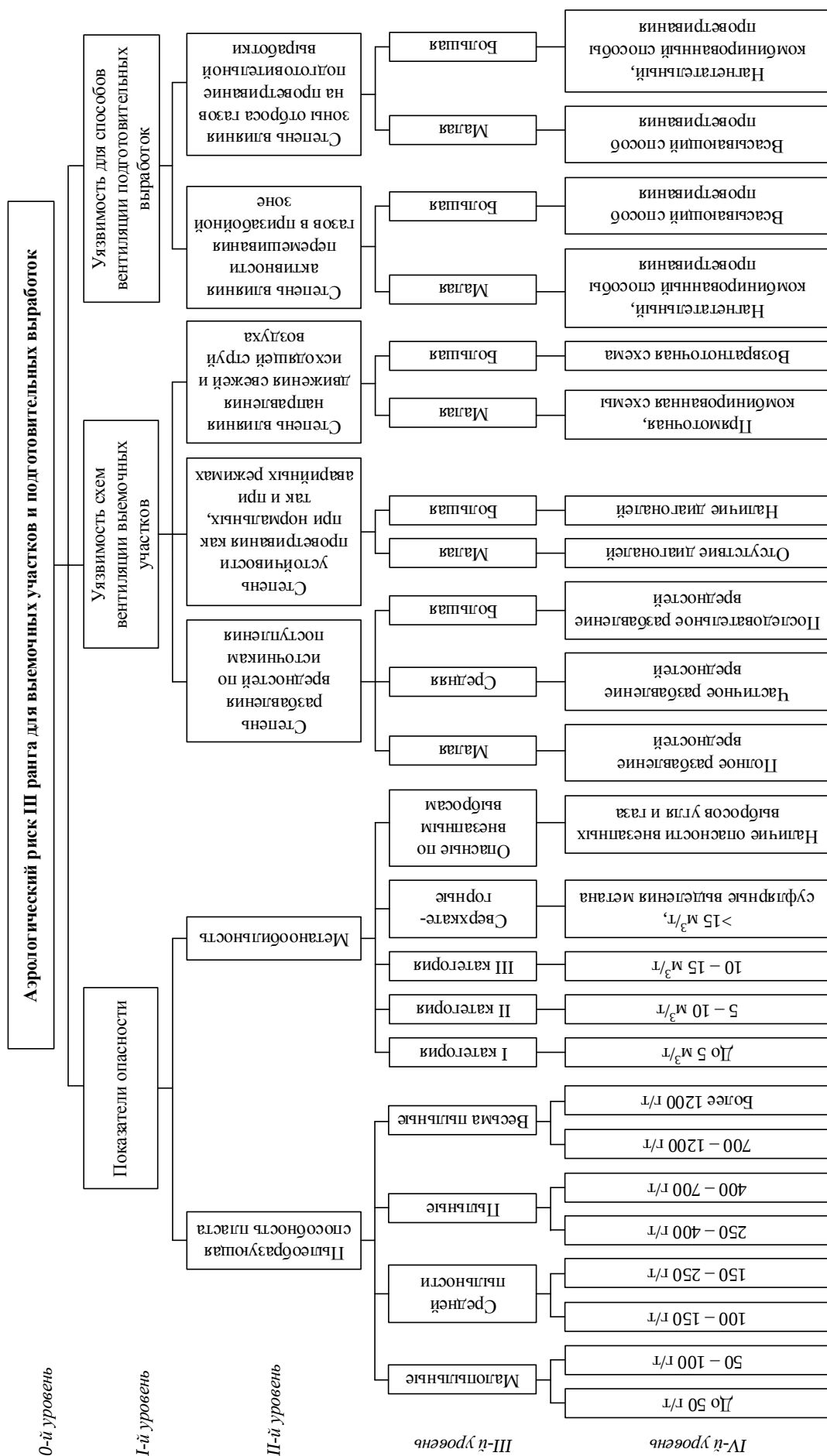


Рисунок 7. Иерархическая структура аэрологического риска III ранга

Таблица 4 – Показатели коэффициента опасности возникновения аварии для шахты в зависимости от установленного кода показателей опасности

№ п/п	Показатели опасности	Степень опасности	Значение показателя опасности	Код	Коэффициент значимости показателя опасности
1	Пылеобразующая способность пласта	Малопыльные	До 50 г/т	1	0,3
			50-100 г/т	2	
		Средней пыльности	100-150 г/т	3	
			150-250 г/т	4	
		Пыльные	250-400 г/т	5	
			400-700 г/т	6	
		Весьма пыльные	700-1200 г/т	7	
			Более 1200 г/т	8	
2	Относительная метанообильность	I	До 5 м ³ /т	1	0,7
		II	От 5 до 10 м ³ /т	2	
		III	От 10 до 15 м ³ /т	3	
		Сверхкатегорные	>15 м ³ /т, суфлярные выделения метана	4	
		Опасные по внезапным выбросам	Наличие опасности внезапных выбросов угля и газа	5	

Уязвимость схем вентиляции шахт определяется: величиной депрессии шахты, степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания шахты. Уязвимость способов вентиляции включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания (ВГП). Уязвимость ВГП определяется: устойчивостью совместной работы ВГП, степенью обеспеченности шахты воздухом, величиной внешних утечек воздуха (табл. 5).

При ранжировании показателей опасности факторов и уязвимости систем вентиляции эксперты проявили достаточно высокую согласованность мнений, подтверждаемую коэффициентом конкордации $W=0,78$ при уровне значимости критерия Пирсона $\lambda^2=31,06\%$, удовлетворяющему требованию $\lambda^2>5\%$.

Аэрологический риск I ранга ($R_{a\text{ ш}}$) рассчитывается по формуле

$$R_{a\text{ ш}} = \lambda_{\text{ш}} \nu_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ш}}$ – коэффициент опасности возникновения аварии для шахты; $\nu_{\text{ш}}$ – коэффициент уязвимости вентиляции шахты.

$$\lambda_{\text{ш}} = \sum_{i=1}^2 \delta_i q_i \lambda_{0,}, \quad (2)$$

где δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности (табл. 4); q_i – значение кода i -го показателя опасности шахтопластов; λ_0 – нормирующий множитель.

$$v_{ш} = \sum_{i=1}^7 \varphi_i a_i v_0 \quad (3)$$

где φ_i – коэффициенты значимости показателей уязвимости (табл. 5); a_i – значение кода i -го показателя уязвимости вентиляционной системы шахты; v_0 – нормирующий множитель.

Таблица 5 – Показатели уязвимости вентиляции угольной шахты

№ п/п	Показатели Уязвимости	Степень уязвимости	Значение показателя уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Депрессия шахты	Малая	До 300 даПа	1	0,3
		Средняя	300-450 даПа	2	
		Большая	Более 450 даПа	3	
2	Устойчивость проветривания шахты	Малая	1	1	0,2
		Средняя	2	2	
		Большая	3	3	
3	Степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха	Малая	Фланговая схема	1	0,1
		Средняя	Комбинированная схема	2	
		Большая	Центрально-сдвоенная схема	3	
4	Степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентилятора главного проветривания	Малая	Всасывающий способ	1	0,2
		Средняя	Комбинированный способ	2	
		Большая	Нагнетательный способ	3	
5	Степень устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания	Малая	Напорные характеристики вентиляторов отличаются друг от друга не более, чем на 50%	1	0,1
		Большая	Напорные характеристики вентиляторов отличаются друг от друга более, чем на 50%	2	
6	Обеспеченность шахты воздухом	Малая	Более 120 %	1	0,05
		Средняя	110-120 %	2	
		Большая	менее 100 %	3	
7	Внешние утечки воздуха	Малые	Менее 20 %	1	0,05
		Большие	Более 20 %	2	

Полученное расчетное значение аэрологического риска I ранга оценивается по критериальным числам (табл. 6), и принимаются решения по предотвращению и минимизации негативных и чрезвычайных ситуаций. Алгоритм снижения аэрологических рисков I ранга состоит в переборе всех возможных вариантов по снижению риска путем понижения степени уязвимости вентиляционных показателей, в выборе из них оптимального варианта и разработке для реализации этого варианта технологических, технических, организационно-технических мероприятий на уровне шахты (рис. 8).

Таблица 6 – Оценка степени аэрологического риска I, II и III рангов для угольных шахт по величине коэффициента риска

Степень аэрологического риска I, II и III рангов	$R_{a ш}$
Малая (нормальный уровень безопасности)	Не более 0,15
Умеренная (пониженный уровень безопасности)	Свыше 0,15, но не более 0,3
Большая (неудовлетворительный уровень безопасности)	Свыше 0,3, но не более 0,5
Аварийная ситуация	Свыше 0,5

Аэрологический риск II ранга. Формулы расчета. Уязвимость вентиляции на уровне рисков II ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции крыльев шахт и уязвимость вентиляционных сооружений. В свою очередь, уязвимость схем вентиляции крыльев шахты определяется: величиной депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков, которая зависит от вида штрека (полевой, пластовый), способа охраны (целик – целик, целик – выработанное пространство, выработанное пространство – выработанное пространство); степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания крыла шахты; величиной тепловой депрессии наклонных выработок.

Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков II ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания. Уязвимость вентиляционных сооружений определяется степенью их влияния на устойчивость проветривания.

Представленные показатели опасности и уязвимости в структуре рисков II ранга иерархически увязаны в функциональную систему, отраженную на рис. 9.

Показатели коэффициента опасности возникновения аварии для крыльев угольных шахт в зависимости от установленного кода показателей опасности такие же, как и для аэрологических рисков I ранга, они приведены в табл. 4.

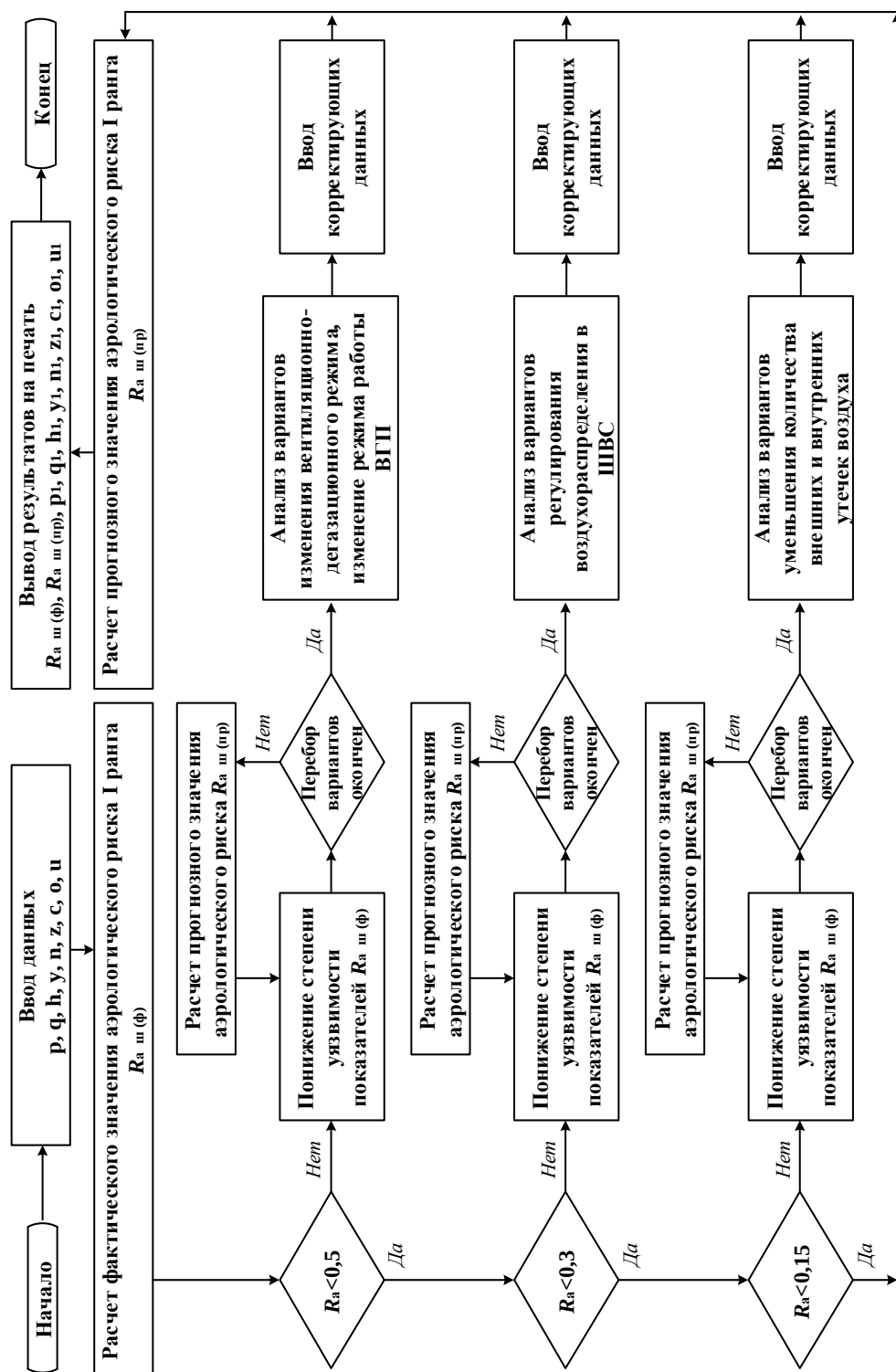


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма расчета и снижения аэрологического риска I ранга

(p – пылеобразующая способность пласта; q – метанообразность; h – депрессия шахты; y – устойчивость проветривания шахты; n – степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; z – степень влияния способа вентиляции на загазование выработок при остановке ВГП; c – степень устойчивости совместной работы ВГП; o – обеспеченность шахты воздухом; u – внешние утечки воздуха)

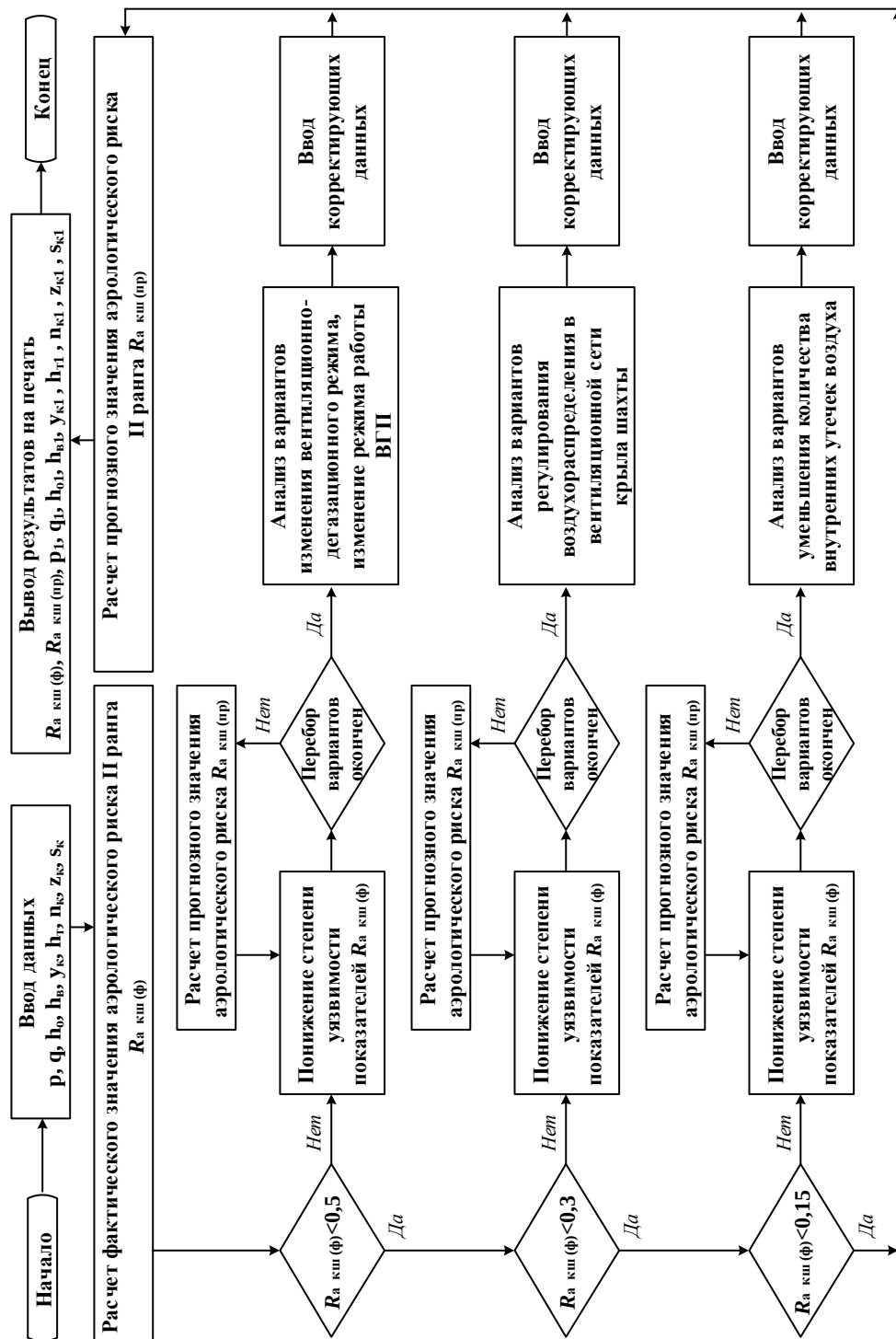


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма расчета и снижения аэрологического риска II ранга

(p – пылеобразующая способность пласта; q – метанообразность шахты; h_o – депрессия откаточного магистрального штрека шахты; $h_{в}$ – депрессия вентиляционного магистрального штрека шахты; $h_{г}$ – тепловая депрессия наклонных выработок с исходящей струей воздуха; $h_{т}$ – устойчивость проветривания крыла шахты; $h_{к}$ – степень влияния направления движения свежей и исходящей струй крыла шахты на утечки воздуха; Z_k – степень влияния способа вентиляции на загазовывание выработок крыла шахты при остановке ВГП; s_k – степень

Аэрологический риск II ранга ($R_{a \text{ кш}}$) рассчитывается по формуле

$$R_{a \text{ кш}} = \lambda_{\text{кш}} \nu_{\text{кш}} \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{кш}}$ – коэффициент опасности возникновения аварии для крыла шахты; $\nu_{\text{кш}}$ – коэффициент уязвимости вентиляции крыла шахты.

$$\lambda_{\text{кш}} = \sum_{i=1}^2 \delta_i q_i \lambda_{0 \text{ кш}} \quad (5)$$

где δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности для крыла шахты (табл. 4); q_i – значение кода i -го показателя опасности шахтопластов для крыла шахты; $\lambda_{0 \text{ кш}}$ – нормирующий множитель.

$$\nu_{\text{кш}} = \sum_{i=1}^6 \varphi_i a_i \nu_{1 \text{ кш}}, \quad (6)$$

где φ_i – коэффициенты значимости показателей уязвимости вентиляции крыла шахты (табл. 7); a_i – значение кода i -го показателя уязвимости вентиляционной системы крыла шахты; $\nu_{1 \text{ кш}}$ – нормирующий множитель.

Таблица 7 – Показатели уязвимости вентиляции крыла угольной шахты

№ п/п	Показатели уязвимости	Степень уязвимости	Значение показателя уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Депрессия откаточного и вентиляционного магистральных штреков	Малая	Менее 20 % от депрессии ВГП	1	0,3
		Большая	Более 20 % от депрессии ВГП	2	
2	Устойчивость проветривания крыла шахты	Малая	1	1	0,2
		Средняя	2	2	
		Большая	3	3	
3	Тепловая депрессия наклонных выработок	Малая	Менее критической депрессии выработки, создаваемой ВГП	1	0,2
		Большая	$\geq$ критической депрессии выработки, создаваемой ВГП	2	
4	Степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха	Малая	Фланговая	1	0,1
		Большая	Центральная	2	
5	Степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания	Малая	Всасывающий способ	1	0,1
		Средняя	Комбинированный способ	2	
		Большая	Нагнетательный способ	3	
6	Степень влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания	Малая	До 150 вент. сооружений	1	0,1
		Большая	150 и более вент. сооружений	2	

По полученным результатам определяется степень аэрологического риска аварий в крыле шахты (табл. 6) и принимаются решения по предотвращению и минимизации негативных и чрезвычайных ситуаций (рис. 9).

Аэрологический риск III ранга. Формулы расчета. Наиболее частыми авариями в угольных шахтах являются взрывы газа и пыли на выемочных участках и в подготовительных выработках, т.е. реализация аэрологических рисков III ранга с учетом основных опасностей на выемочных участках и в подготовительных выработках и основных видов уязвимости схем вентиляции выемочных участков и способов проветривания тупиковых выработок (табл. 8).

Таблица 8 – Показатели аэрологических рисков III ранга

№ п/п	Показатели аэрологических рисков III ранга	Примечание
1	Аэрологический риск R_a на выемочных участках	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка
2	Аэрологический риск аварий $R_{ту в}$ на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения горных работ и уязвимости выемочного участка по технологическим факторам
3	Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации, газоотсасывающих установок и газодренажного штрека
4	Риск загазирования участка $R_{заг. уч, сут^{-1}}$	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка
5	Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$ при повторном использовании выработки, $сут^{-1}$	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка, а также повторное использование выработки
6	Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках R_a	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок
7	Аэрологический риск аварий $R_{ту п в}$ в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения работ и уязвимости подготовительной выработки по технологическим факторам
8	Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации

Выемочные участки. Аэрологический риск аварий на выемочных участках угольных шахт рассчитывается по формуле:

$$R_a = \lambda \nu_y, \quad (7)$$

где λ – коэффициент опасности возникновения аварии на выемочном участке; ν_y – коэффициент уязвимости схем вентиляции выемочного участка.

Коэффициент опасности λ возникновения аварии на выемочном участке, обусловленной пылевым и газовым факторами:

$$\lambda = \sum_{i=1}^2 \delta_i q_i \lambda_0, \quad (8)$$

где δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности (табл. 4); q_i – значение кода i -го показателя опасности шахтопластов; λ_0 – нормирующий множитель.

Коэффициент уязвимости ν_y схем проветривания выемочного участка рассчитывается по формуле

$$\nu_y = \sum_{i=1}^3 \varphi_i a_i \nu_0 \quad (9)$$

где φ_i – коэффициенты значимости показателей уязвимости схем вентиляции участка (табл. 9); a_i – значение кода i -го показателя уязвимости схемы вентиляции выемочного участка; ν_0 – нормирующий множитель.

Показатели уязвимости схем вентиляции выемочных участков приведены в табл. 9. По полученным результатам определяется степень аэрологического риска аварий на выемочном участке угольной шахты (табл. 6) и принимаются решения по предотвращению и минимизации негативных и чрезвычайных ситуаций (рис. 10).

Подготовительные выработки. Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках:

$$R_a = \lambda \cdot p_y, \quad (10)$$

где λ – коэффициент опасности; p_y – коэффициент уязвимости схем и способов вентиляции тупиковых выработок.

Коэффициент уязвимости p_y рассчитывается по формуле:

$$p_y = \sum_{i=1}^2 \varphi_i a_i \nu_0 \quad (11)$$

где φ_i – коэффициент значимости i -го показателя уязвимости подготовительной выработки (табл. 10); a_i – значение кода i -го показателя уязвимости подготовительной выработки; ν_0 – нормирующий множитель.

Таблица 9 – Показатели уязвимости схем вентиляции выемочных участков

№ п/п	Показатели уязвимости	Степень уязвимости	Значение показателя уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Степень разбавления вредностей по источникам поступления	Малая	Полное	1	0,5
		Средняя	Частичное	2	
		Большая	Последовательное	3	
2	Степень устойчивости проветривания как при нормальных, так и при аварийных режимах	Большая	Отсутствие диагоналей	1	0,3
		Малая	Наличие диагоналей	2	
3	Степень влияния направления движения свежей и исходящей струй воздуха	Малая	Прямоточная, комбинированная схемы	1	0,2
		Большая	Возвратноточная схема	2	

Таблица 10 – Показатели уязвимости для схем и способов вентиляции подготовительных выработок

№ п/п	Показатели уязвимости	Степень уязвимости	Значение показателя уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Степень влияния активности перемешивания газов в призабойной зоне	Малая	Нагнетательный, комбинированный способы проветривания	1	0,7
		Большая	Всасывающий способ проветривания	2	
2	Степень влияния зоны отброса газов на проветривание подготовительной выработки	Малая	Всасывающий способ проветривания	1	0,3
		Большая	Нагнетательный, комбинированный способы проветривания	2	

Риск аварий, возникающий под влиянием тяжелых углеводородов (для выемочных участков). Для выемочных участков аэрологический риск аварий ($R_{\text{ту в}}$), возникающий под влиянием тяжелых углеводородов, рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ту в}} = \lambda_{\text{ту}} \cdot v_{\text{ту в}}, \quad (12)$$

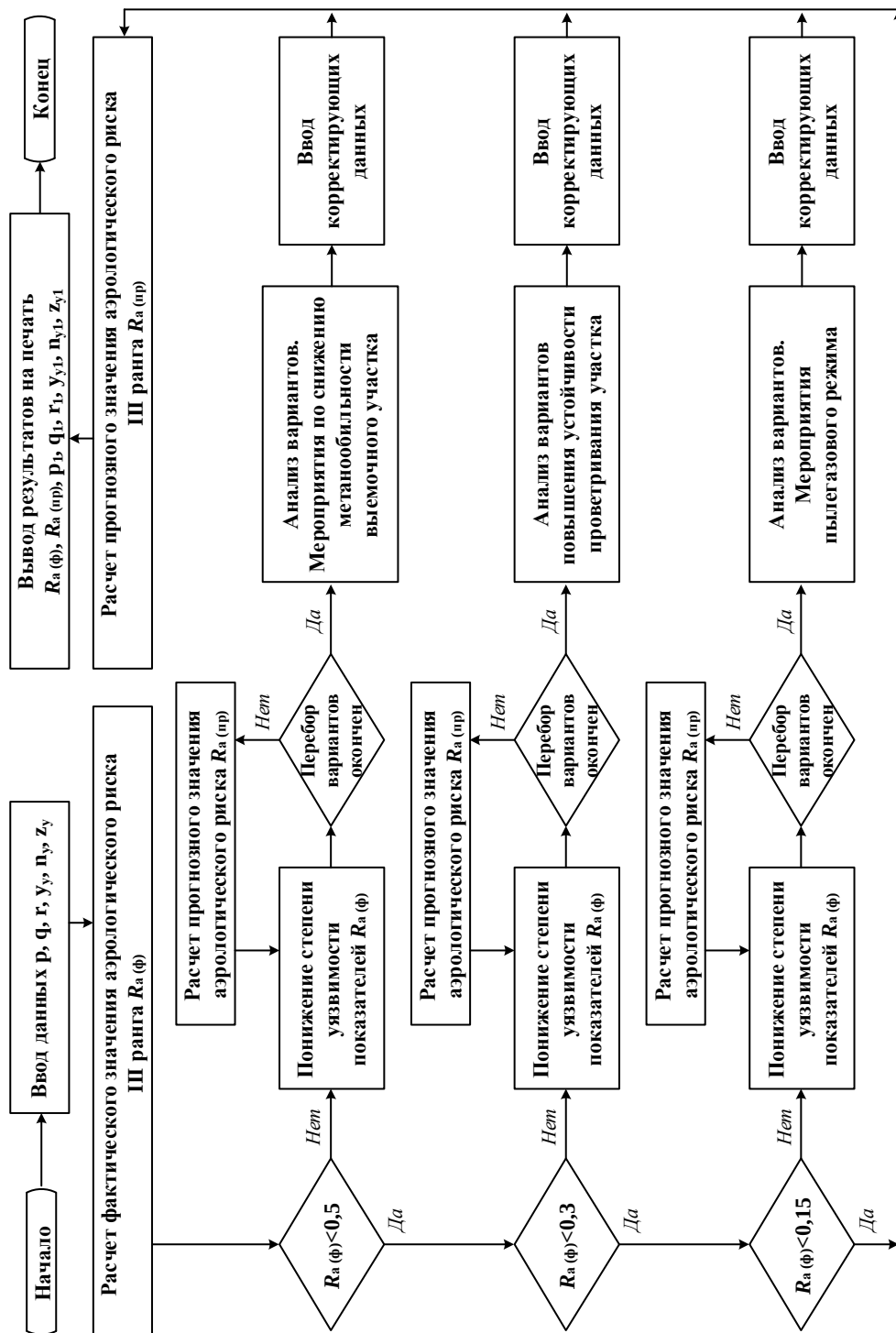


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма расчета и снижения аэрологического риска III ранга на выемочных участках

(p – пылеобразующая способность пласта; q – метанообильность шахты; y_y – устойчивость проветривания выемочного участка; n_y – степень разбавления вредностей по источникам поступления; z_y – степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха на выемочном участке)

где $\lambda_{\text{ту}}$ – коэффициент опасности возникновения аварии, обусловленный наличием тяжелых углеводородов; $\nu_{\text{ту}}$ – коэффициент уязвимости выемочного участка, вызванный наличием тяжелых углеводородов.

Коэффициент опасности ($\lambda_{\text{ту}}$) возникновения аварии, обусловленный наличием тяжелых углеводородов, рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\text{ту}} = \sum_{i=1}^4 \delta_i q_i \lambda_0, \quad (13)$$

где δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности по наличию тяжелых углеводородов в угольных пластах (табл. 11); q_i – значение кода i -го показателя опасности по наличию тяжелых углеводородов; λ_0 – нормирующий множитель.

Коэффициент уязвимости $\nu_{\text{ту в}}$ выемочного участка, обусловленной наличием тяжелых углеводородов в угольных пластах, рассчитывается по формуле:

$$\nu_{\text{ту в}} = \sum_{i=1}^4 \varphi_i a_i \nu_0, \quad (14)$$

где φ_i – коэффициент значимости i -го показателя уязвимости по наличию тяжелых углеводородов в угольных пластах (табл. 12); φ_i – значение кода i -го показателя уязвимости по наличию тяжелых углеводородов; ν_0 – нормирующий множитель.

Риск аварий, возникающий под влиянием тяжелых углеводородов (для подготовительных выработок). Для подготовительных выработок аэрологический риск аварий, возникающий под влиянием тяжелых углеводородов в угольных пластах, рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ту п}} = \lambda_{\text{ту}} \cdot \nu_{\text{ту п}}. \quad (15)$$

Коэффициент опасности ($\lambda_{\text{ту}}$) возникновения аварии, обусловленной наличием тяжелых углеводородов в угольных пластах, рассчитывается одинаково как для выемочных участков, так и для подготовительных выработок.

Коэффициент уязвимости $\nu_{\text{ту п}}$ (табл. 13) подготовительных выработок, обусловленной наличием тяжелых углеводородов в угольных пластах, рассчитывается по формуле:

$$\nu_{\text{ту п}} = \sum_{i=1}^2 \varphi_i a_i \nu_{0\text{п}} \quad (16)$$

где φ_i – коэффициент значимости i -го показателя уязвимости подготовительных выработок по наличию тяжелых углеводородов в угольных пластах (табл. 12); φ_i – значение кода i -го показателя уязвимости по наличию тяжелых углеводородов; $\nu_{0\text{п}}$ – нормирующий множитель.

Таблица 11 – Показатели опасностей на выемочных участках и в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов

№ п/п	Показатели опасности	Значение показателя опасности	Степень опасности	Код	Коэффициент значимости показателя опасности
1	Содержание тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), %	<20	Малая	1	0,3
		≥20	Большая	2	
2	Метаноносность угольных пластов, м ³ /т	<5	Малая	1	0,3
		≥5, <9	Средняя	2	
		≥9	Большая	3	
3	Удельное пылевыведение, г/т	До 100	Малая	1	0,2
		100-250	Средняя	2	
		250-700	Большая	3	
		≥700	Очень большая	4	
4	Глубина ведения горных работ, м	<300	Малая	1	0,2
		≥300, <450	Средняя	2	
		≥450 <700	Большая	3	
		≥700	Очень большая	4	

Таблица 12 – Показатели уязвимости выемочных участков, обусловленной наличием тяжелых углеводородов в угольных пластах

№ п/п	Показатели уязвимости выемочного участка	Значение показателя уязвимости	Степень уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Нагрузка на очистной забой, т/сут	<3000	Малая	1	0,3
		≥3000, <6000	Средняя	2	
		≥6000	Большая	3	
2	Абсолютная метанообильность выемочного участка, м ³ /мин	<20	Малая	1	0,3
		≥20, <70	Средняя	2	
		≥70, <140	Большая	3	
		≥140	Очень большая	4	
3	Скорость подвигания очистного забоя, м/сут	<3	Малая	1	0,25
		≥3, <9	Средняя	2	
		≥9	Большая	3	
4	Длина лавы, м	<200	Малая	1	0,15
		≥200, <250	Средняя	2	
		≥250	Большая	3	

Таблица 13 – Показатели уязвимости подготовительных выработок, обусловленной наличием тяжелых углеводородов в угольных пластах

№ п/п	Показатели уязвимости подготовительной выработки	Значение показателя уязвимости	Степень уязвимости	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости
1	Абсолютная метанообильность подготовительной выработки, м ³ /мин	<2,5	Малая	1	0,6
		≥2,5, <5	Средняя	2	
		≥5	Большая	3	
2	Скорость подвигания забоя подготовительной выработки, м/сут	<3	Малая	1	0,4
		≥3, <7	Средняя	2	
		≥7	Большая	3	

По полученным результатам определяется степень аэрологического риска аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов в подготовительных выработках угольных шахт (табл. 6) и принимаются решения по предотвращению и минимизации негативных и чрезвычайных ситуаций (рис. 11).

Оценка рисков загазирования выработок на выемочных участках. Вероятность безотказной работы горных выработок и шахты в целом $P(t)$ в течение времени t можно определить по формуле:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right), \quad (17)$$

где $\lambda(\tau)$ – интенсивность отказов.

При $\lambda(\tau) = \lambda = \text{const}$ риск загазирования выемочного участка рассчитывается по формуле

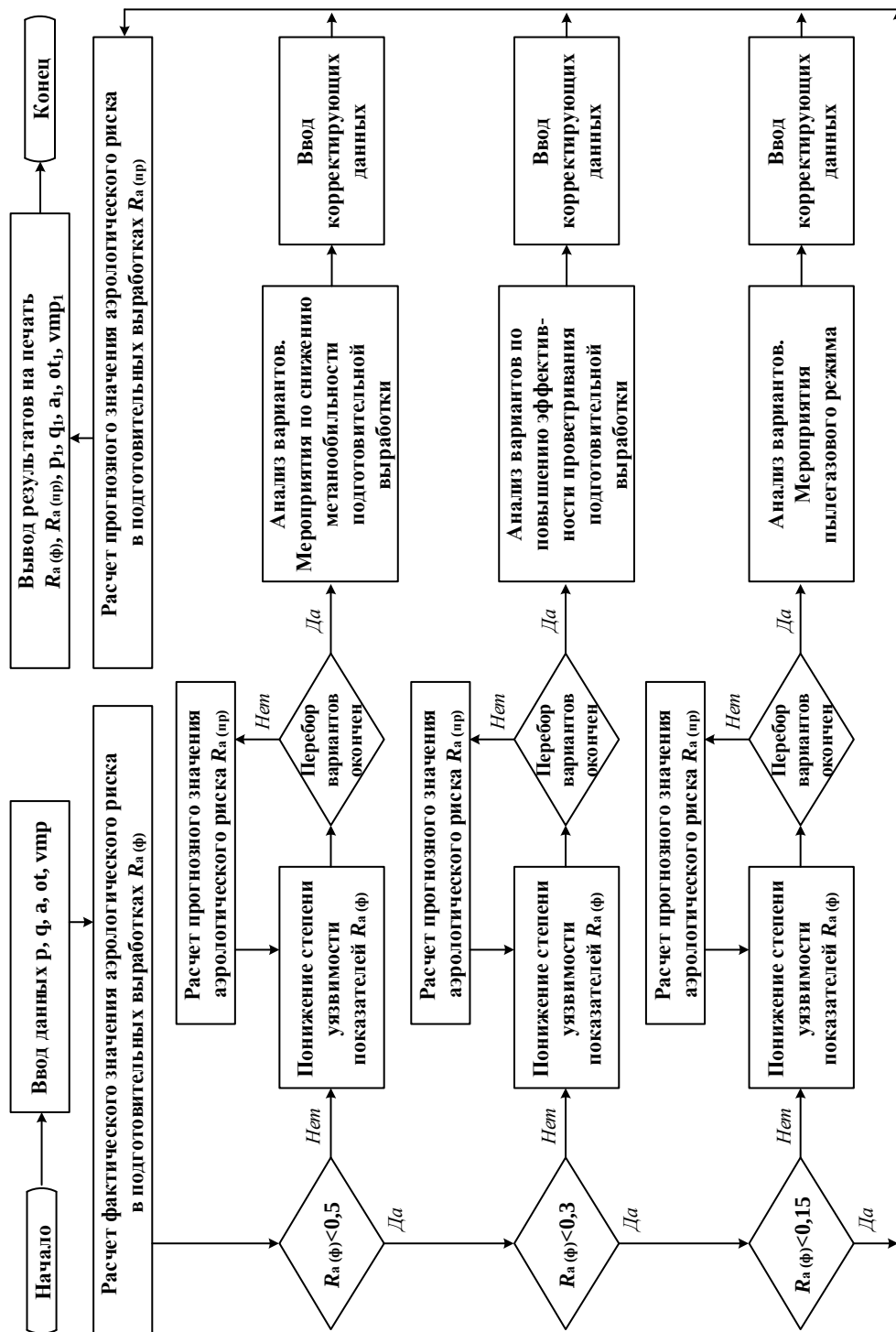
$$R_{\text{заг}} = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (18)$$

По среднестатистическим данным интенсивность отказов в откаточных выработках можно принять равной 0,013 сут⁻¹, интенсивность отказов в вентиляционных выработках можно принять равной 0,066 сут⁻¹, интенсивность отказов в лавах можно принять равной 0,02366 сут⁻¹.

Для выемочного участка при возвратноточной схеме проветривания вероятность безотказной работы по правилу умножения вероятностей будет равна произведению вероятностей безотказной работы откаточного штрека, лавы и вентиляционного штрека

$$R_{\text{заг,уч}} = 1 - P_{\text{отк.ш.}} \cdot P_{\text{лавы}} \cdot P_{\text{вент.ш.}}, \quad (19)$$

где $P_{\text{отк.ш.}}$ – вероятность безотказной работы откаточного штрека; $P_{\text{лавы}}$ – вероятность безотказной работы лавы; $P_{\text{вент.ш.}}$ – вероятность безотказной работы вентиляционного штрека.



Чтобы учесть в расчетной формуле (19) процесс загазирования верхней части лавы при возвратноточной схеме проветривания, условно можно разделить лаву на два участка, соединенных последовательно. По статистическим данным для возвратноточной схемы проветривания выемочного участка средняя интенсивность отказов в верхней части лавы равна 0,1055 сут⁻¹. Тогда для U-образной схемы проветривания будем иметь:

$$R_{\text{заг.уч}} = 1 - P_{\text{отк.ш}} \cdot P_{\text{лавы}} \cdot P_{\text{вч.л}} \cdot P_{\text{вент.ш}}, \quad (20)$$

где $P_{\text{вч.л}}$ – вероятность безотказной работы верхней части лавы.

При прямоточной схеме вентиляции выемочного участка с последовательным разбавлением вредностей (Z-образная схема) и отводом исходящей струи в направлении выработанного пространства риск загазирования участка за сутки можно рассчитать по формуле (20).

В газовых шахтах с высокой газообильностью разрабатываемых пластов и выработанного пространства при ведении горных работ на глубоких горизонтах необходимо применять схемы вентиляции с обособленным разбавлением метана, поступающего из различных источников. Для Y-образных схем вентиляции формула для расчета риска загазирования выемочного участка примет вид:

$$R_{\text{заг.уч}} = 1 - (P_{\text{отк.ш}} \cdot P_{\text{лавы}} + P_{\text{подсв}} - P_{\text{отк.ш}} \cdot P_{\text{лавы}} \cdot P_{\text{подсв}}) P_{\text{вент.ш}}. \quad (21)$$

Из анализа рассчитанных значений риска загазирования выемочного участка $R_{\text{заг.уч}}$ (табл. 14) следует, что при одних и тех же горнотехнических условиях $R_{\text{заг.уч}}$ в 2,9 раз больше для U-образной схемы, чем для Y-образной, и в 1,9 раз больше, чем для Z-образной.

Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологических рисков шахт. При принятии проектных, технических решений помимо оценки риска загазирования необходима оценка прогнозного значения аэрологического риска $Q_{\text{пр}}$, позволяющего определить граничные условия применения схем вентиляции выемочных участков при проектировании совместной работы вентиляции, дегазации и газоотсоса для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий.

Оценка обобщенного показателя прогнозного значения аэрологического риска производится по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = R_a + R_a \kappa_1 + R_a \kappa_2 - R_a \kappa_3 - R_a \kappa_4 - R_a \kappa_5, \quad (22)$$

где κ_1 – поправочный коэффициент, учитывающий склонность угольных пластов к самовозгоранию; κ_2 – поправочный коэффициент, учитывающий склонность к горным ударам; κ_3 – поправочный коэффициент, учитывающий применение дегазации; κ_4 – поправочный коэффициент, учитывающий применение газоотсасывающих установок; κ_5 – поправочный коэффициент, учитывающий использование газодренажных выработок.

Таблица 14 – Значения риска загазирования выемочного участка для основных схем вентиляции

Схема вентиляции	Горнотехнические условия	Риск загазирования выемочного участка $R_{\text{заг.уч.}, \text{сут}^{-1}}$
U-образная	Производительность лавы 2400-3140 т/сут; столбовая система разработки; крепость пород средняя; штреки расположены в массиве угля; шахта сверхкатегорная; вентиляция участка возвратноточная	0,189
Z-образная	Производительность лавы 2400-3140 т/сут; столбовая система разработки; крепость пород средняя; штреки расположены в массиве угля; шахта сверхкатегорная; вентиляция участка прямоточная	0,097
Y-образная	Производительность лавы 2400-3140 т/сут; столбовая система разработки; крепость пород средняя; штреки расположены в массиве угля; шахта сверхкатегорная; вентиляция участка прямоточная с подсвежением	0,065

Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = R_a + R_a \cdot b_1 + R_a \cdot b_2 - R_a \cdot b_3, \quad (23)$$

где b_1 – коэффициент, характеризующий склонность угольных пластов к самовозгоранию; b_2 – коэффициент, характеризующий склонность к горным ударам; b_3 – коэффициент, отражающий применение дегазации.

Расчеты показателей прогнозного значения аэрологического риска на выемочном участке угольной шахты для трех схем вентиляции (прямоточной, возвратноточной и комбинированной) велись для шахт всех пяти категорий, разрабатывающих пласты с удельным пылевыведением от 250 до 1200 г/т для видов опасностей шахтопластов: склонных к самовозгоранию, склонных к горным ударам и к совместному проявлению самовозгорания и горных ударов.

Последние три вида опасностей шахтопластов рассматривались для схем вентиляции без диагонального соединения и схем, включающих неустойчивое

диагональное соединение. Как в схемах без диагоналей, так и в схемах с диагоналями были выполнены расчеты по снижению аэрологического риска за счет применения мероприятий системы управления газовыделением.

Анализ расчетных значений аэрологического риска показывает, что наименьшее значение риска, равное 0,2592, имеют комбинированные схемы вентиляции, затем схемы вентиляции с прямоточным движением воздуха (0,2848), и затем схемы с возвратноточным движением воздуха (0,4628), риск которых почти в 2 раза больше, чем для прямоточных и комбинированных схем. Даже с применением мероприятий по управлению газовыделением значение аэрологического риска для возвратноточных схем близко к аварийной ситуации.

Для получения визуальной аналитики реализации рисков при усложнении горно-геологических условий разработки угольных месторождений были выполнены расчеты значений аэрологического риска I, II и III рангов для двух состояний фоновых факторов (наиболее благоприятных и наиболее неблагоприятных) при разных схемах и способах вентиляции шахты, крыла шахты, выемочного участка. Полученные расчетные значения риска были разбиты на диапазоны. Анализ данных табл. 14 показывает, что при благоприятных значениях фоновых показателей аэрологического риска его степень варьируется от малой до умеренной, и лишь для шахт с устойчивостью проветривания третьей категории, опасных по внезапным выбросам угля и газа, степень риска достигает большой степени. При неблагоприятных условиях даже для шахт с высокой степенью устойчивости, независимо от схемы и способа вентиляции шахты, степень риска чрезвычайно высока, и достигает аварийной ситуации.

При благоприятных фоновых показателях аэрологического риска II ранга (табл. 14) его степень так же, как и для риска I ранга, варьируется от малой до умеренной, и лишь для шахт с устойчивостью проветривания третьей категории, опасных по внезапным выбросам угля и газа, риск достигает большой степени. Для неблагоприятных условий степень риска чрезвычайно высокая и достигает аварийной ситуации для всех категорий устойчивости, и только для всасывающего способа проветривания для шахт с первой категорией устойчивости проветривания степень риска большая, но не достигает аварийной ситуации.

Анализ данных табл. 15 показывает, что даже при благоприятных горно-геологических условиях разработки угольных пластов степень риска III ранга достигает аварийной ситуации для возвратноточных схем вентиляции с последовательным разбавлением вредностей по источникам поступления. В случае неблагоприятных условий для прямоточных и комбинированных схем вентиляции с полным разбавлением вредностей степень риска удастся не доводить до аварийной ситуации.

Таблица 15 – Результаты оценки степени аэрологического риска III ранга при отработке пластов, склонных к горным ударам и самовозгоранию

Степень устойчивости проветривания как при нормальных, так и при аварийных режимах	Степень аэрологического риска III ранга						
	Прямоточная схема			Комбинированная схема	Возвратноточная схема		
	Полное разбавление вредностей	Частичное разбавление вредностей	Последовательное разбавление		Полное разбавление вредностей	Частичное разбавление вредностей	Последовательное разбавление
Сверхкатегорные шахты							
Отсутствие диагоналей, коэффициент устойчивости >15	■	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■	■
Наличие диагоналей, неустойчивое проветривание	■	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■	■
Шахты, опасные по внезапным выбросам угля и газа							
Отсутствие диагоналей, коэффициент устойчивости >15	■	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■	■
Наличие диагоналей, неустойчивое проветривание	■	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■	■
Степень (значение) риска Малая (менее 0,15) Умеренная (0,15 – 0,3) Большая (0,3 – 0,5) Аварийная ситуация (более 0,5)							

Оценка и управление аэрологическими рисками аварий в угольных шахтах основываются на создании информационно-аналитической системы данных. На рис. 14 представлены результаты расчетов пяти видов аэрологического риска для 8-ми шахт Кузбасса. При расчетах принята максимальная глубина ведения горных работ. При установлении прогнозного значения риска учтена склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам; для шахт № 2 и № 8 коэффициент

эффективности дегазации составил 0,95 и 0,9 соответственно, для остальных шахт принят средний коэффициент эффективности дегазации 0,6.

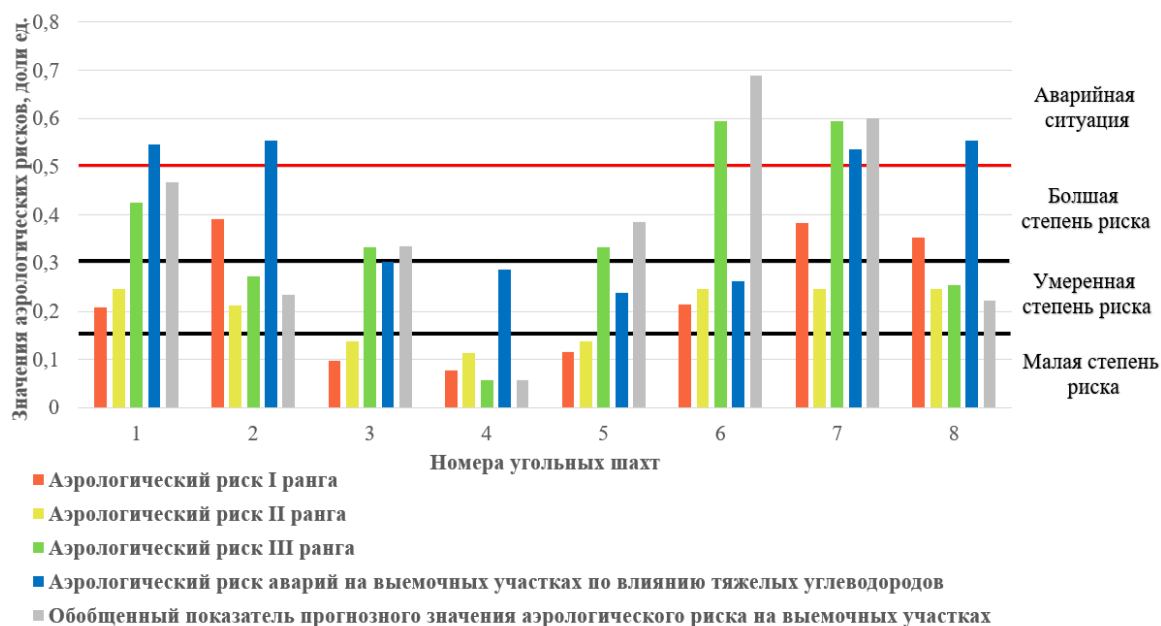


Рисунок 14 – Сравнительная оценка аэрологических рисков для угольных шахт

Для подготовительных выработок рассчитаны риск аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, и прогнозный показатель аэрологического риска с учетом применения мероприятий по дегазации пласта.

Из анализа данных следует, что аэрологические риски трех шахт (№ 3, № 4, № 5) характеризуются малыми значениями и находятся в диапазоне нормального уровня безопасности. Незначительно выходят из этого диапазона риски выемочных участков этих шахт, имеющих возвратноточные схемы проветривания с наличием в них диагональных соединений, но из-за небольшой абсолютной газообильности участков (от 17 до 28, 4 м³/т) эти риски большой опасности не представляют. В целом, для этих трех шахт характерна малая степень аэрологических рисков.

Оставшиеся пять шахт являются сверхкатегорными, и все пять попадают в зону больших рисков как шахты, разрабатывающие пласты, содержащие тяжелые углеводороды в остаточных газах углей, склонных к самовозгоранию и горным ударам. Эти риски накладываются на уязвимость схем вентиляции, не обеспечивающих полное разбавление вредностей по источникам их выделения (шахты № 6, № 7). Для шахты № 2 риски выемочных участков небольшие, но зато риски высшего ранга находятся в области аварийной работы шахты, что требует незамедлительных технических решений в отношении схемы вентиляции шахты.

Самый низкий уровень аэрологических рисков (умеренная степень) всех рангов характерен для шахт № 8 и № 1, что соответствует пониженному уровню безопасности, требующему мониторинга горно-геологических и горнотехнических параметров, составляющих систему аэрологической безопасности шахт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, изложено решение актуальной для угольной отрасли проблемы – разработана научно обоснованная методология по повышению безопасности горных работ на основе оценки, прогноза и снижения аэрологических рисков аварий путем декомпозиции рисков по иерархическим уровням, включающим риски аварий, оцениваемых на основе установленных зависимостей реализации рисков, связанных с газообильностью очистного забоя, содержанием тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов и отложившейся пыли, пылеобразующей способности разрабатываемого пласта и степени уязвимости схемы вентиляции участка, подготовительной выработки, крыла шахты и шахты в целом, внедрение которой вносит значительный вклад в развитие отрасли.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. К настоящему времени не решена проблема оценки, прогнозирования и снижения аэрологических рисков по уровням иерархической структуры угольной шахты. Рекомендуемые методики по оценке риска не учитывают взаимного влияния природных и техногенных рисков горного производства и не обеспечивают необходимой детализации, поэтому не могут быть использованы без дополнительных исследований. Решения в области обеспечения аэрологической безопасности основываются, как правило, на мнении практиков, а не на научной методологии. Следствием этого является широкое применение схем проветривания выемочных участков, характеризующихся минимальными затратами на обеспечение метанобезопасности и, соответственно, высокой степенью аэрологического риска.

2. Присутствие в рудничной атмосфере тяжелых углеводородов создает повышенную опасность, так как эти газы образуют взрывчатые смеси с воздухом при более низких концентрациях, чем метан. При разработке высокогазоносных углей средней стадии метаморфизма возникают дополнительные риски вспышек и воспламенения метана при резании угля, а также риски его самовозгорания.

Рудничная атмосфера высокогазообильных шахт, разрабатывающих пласты средней стадии метаморфизма, должна квалифицироваться как смесь «воздух – метан – гомологи метана – угольная пыль».

3. Принципиальная схема построения иерархических структур аэрологических рисков всех рангов одинакова, в ней используется в основном один и тот же набор опасных факторов горного производства, но области воздействия этих факторов на каждом уровне разные, что устанавливает разные уровни и виды уязвимости системы вентиляции. Для оценки рисков I ранга выбирается самый опасный пласт шахты, для оценки рисков II ранга – самый опасный пласт крыла шахты, для оценки рисков III ранга берутся все разрабатываемые угольные пласты.

4. К фоновым факторам аэрологического риска относятся: относительная метанообильность шахты, крыла шахты, выемочного участка, подготовительной выработки; пылеобразующая способность пласта; наличие тяжелых углеводородов в остаточных газах углей, пыли; температура горных пород, глубина разработки.

5. Уязвимость вентиляции на уровне рисков I ранга определяется: величиной депрессии шахты, степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй; устойчивостью проветривания шахты. Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков I ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания. Уязвимость вентиляторов главного проветривания определяется: устойчивостью совместной работы вентиляторов главного проветривания, степенью обеспеченности шахты воздухом, величиной внешних утечек воздуха.

6. Уязвимость вентиляции на уровне рисков II ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции крыльев шахт и уязвимость вентиляционных сооружений. Уязвимость схем вентиляции крыльев шахты определяется: величиной депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков, способом охраны данных выработок, степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания крыла шахты; величиной тепловой депрессии наклонных выработок. Уязвимость способов вентиляции включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование подготовительных выработок при остановке вентиляторов местного проветривания. Уязвимость вентиляционных сооружений определяется степенью их влияния на устойчивость проветривания.

7. Уязвимость вентиляции на уровне рисков III ранга включает: степень разбавления вредностей по источникам поступления, степень устойчивости проветривания как при нормальных, так и при аварийных режимах, степень влияния направления движения свежей и исходящей струй воздуха. Выделены следующие виды уязвимости подготовительных выработок: степень влияния активности перемешивания газов в призабойной зоне, степень влияния зоны отброса газов на проветривание подготовительной выработки.

8. Основные закономерности снижения аэрологических рисков в угольных шахтах лежат в области применения технических решений, направленных на управление фоновой составляющей (управление свойствами и состоянием угольных пластов; оптимизация параметров предварительного увлажнения, заблаговременной, предварительной, пластовой дегазации; управление техническими показателями систем противоаварийной защиты и т.д.), во вторую очередь – это мероприятия организационно-технологического характера (нагрузка на очистной забой, абсолютная и относительная газообильность, скорость подвигания очистного забоя и т.д.).

9. Алгоритм снижения аэрологических рисков I, II и III рангов состоит в переборе всех возможных вариантов по снижению риска путем понижения степени уязвимости вентиляционных показателей, в выборе оптимального варианта и разработке для реализации этого варианта технологических, технических, организационно-технических мероприятий.

10. Анализ рассчитанных значений риска загазирования выемочного участка $R_{\text{заг. уч}}$ показал, что при одних и тех же горнотехнических условиях $R_{\text{заг. уч}}$ в 2,9 раз больше для U-образной схемы, чем для Y-образной, и в 1,9 раз больше, чем для Z-образной. При сравнении между собой Z- и Y-образных схем следует, что первая опаснее второй в 1,4 раза. В газовых шахтах необходимо применять Y-образные схемы вентиляции с обособленным разбавлением метана.

11. Средние значения относительного показателя аэрологического риска по фактору аэродинамического старения выработок составили: для участковых откаточных штреков – 0,541; для участковых вентиляционных штреков – 0,842; для капитальных наклонных выработок – 0,172; для капитальных горизонтальных выработок – 0,101. Значения риска загазирования выемочного участка с учетом аэродинамического старения при повторном использовании откаточного штрека в качестве вентиляционного составят: для U-образной схемы вентиляции – 0,2403 (в 1,27 раза больше исходного значения риска

загазирования); для Z-образной схемы вентиляции – 0,155 (в 1,6 раза больше исходного значения риска загазирования); для Y-образной схемы вентиляции – 0,1244 (в 1,9 раз больше исходного значения риска загазирования).

12. Наименьшее прогнозное значение аэрологического риска (с учетом мероприятий по управлению газовыделением), равное 0,2592, имеют схемы вентиляции с подсвеживанием, затем прямоточные схемы вентиляции с выдачей исходящей струи на выработанное пространство (0,2848), и затем схемы с возвратноточным движением воздуха (0,4628), в этом случае аэрологический риск почти в 2 раза больше, чем для прямоточных и комбинированных схем.

13. Разработанная инженерная методика оценки и снижения аэрологических рисков на угольных шахтах позволяет на основе ранжирования угольных шахт по уровням аэрологических рисков выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Результаты исследований отражены в следующих публикациях автора:

1. Скопинцева О.В., Баловцев С.В., Михайлова В.Н. Показатели аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 5. – С. 229-234. **(БАК)**

2. Баловцев С.В., Михайлова В.Н. Обоснование иерархической структуры аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт // Современные проблемы шахтного метана (Сборник научных трудов к 85-летию проф. Н.В. Ножкина). – М.: ИД ООО «Роликс». – 2014. – С. 181-187.

3. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Метод оценки и управления аэрологическим риском аварий на выемочных участках угольных шахт // Современные проблемы шахтного метана (Сборник научных трудов к 85-летию проф. Н.В. Ножкина). – М.: ИД ООО «Роликс». – 2014. – С. 246-252.

4. Баловцев С.В. Анализ причинно-следственных связей между событиями, приводящими к чрезвычайным ситуациям // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 7. – С. 328-332. **(БАК)**

5. Баловцев С.В. Оценка аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт, опасных по взрывам газа и пыли // Горный журнал. – 2015. – №5. – С. 91-93. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19. **(БАК, Scopus)**

6. Баловцев С.В. Прогнозирование аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S4-3. – С. 3-8. **(БАК)**

7. Баловцев С.В. Управление аэрологическими рисками аварий на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S39. – С. 3-5. **(БАК)**

8. Баловцев С.В. Теория и практика в методическом обеспечении управления производственными рисками на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S39. – С. 6-9. **(БАК)**

9. Баловцев С.В. Обоснование аэрологической безопасности при проектировании угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S4. – С. 11-15. **(БАК)**
10. Баловцев С.В. Проблемы и перспективы создания единой методологии оценки риска аварий на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S12. – С. 56-60. **(БАК)**
11. Баловцев С.В. К методике прогноза взрывобезопасности выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №11. – С. 218-226. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-218-226. **(БАК, Scopus)**
12. Баловцев С.В. Оценка схем вентиляции с учетом горно-геологических и горнотехнологических условий отработки угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №6. – С. 173-183. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-173-183. **(БАК, Scopus)**
13. Баловцев С.В. Прогнозирование снижения аэрологического риска при управлении газовыделением на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S10. – С. 110-115. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-10-110-115. **(БАК)**
14. Баловцев С.В., Воробьева О.В. Анализ состояния безопасности в угольной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S17. – С. 3-10. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-3-10. **(БАК)**
15. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Аэрологические риски как ключевой фактор обоснования безопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № S1. – С. 5–13. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-5-13. **(БАК)**
16. Баловцев С.В., Воробьева О.В. Многофункциональные системы промышленной безопасности в угледобывающей отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № S1. – С.31–38. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-31-38. **(БАК)**
17. Баловцев С.В. Аэрологические риски при управлении дегазацией на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № S1. – С. 14–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-14-20. **(БАК)**
18. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Коликов К.С. Управление аэрологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 85–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94. **(БАК, Scopus)**
19. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. Оценка влияния аэродинамического старения выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6-1. – С. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-74-83. **(БАК, Scopus)**
20. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. Управление аэрологическими рисками угольных шахт на основе статистических данных системы аэрогазового контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 78–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89. **(БАК, Scopus)**
21. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Оценка влияния повторно используемых выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 40–53. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-40-53. **(БАК, Scopus)**
22. Баловцев С.В. Сравнительная оценка аэрологических рисков на действующих угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-5-17. **(БАК, Scopus)**
23. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Коликов К.С. Управление аэрологическими рисками в подготовительных выработках угольных шахт // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 107–116. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-107-116. **(Scopus)**

24. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285. (**Scopus**)
25. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Критерии опасности и уязвимости в структуре рангов аэрологических рисков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10. – С.153–165. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_153. (**БАК, Scopus**)
26. Баловцев С.В. Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах // Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 310–319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18. (**Scopus**)
27. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Научно обоснованные технологические решения по снижению аэрологических рисков на действующих и проектируемых угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 139–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_139. (**Scopus**)
28. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15, № 1. С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16. (**Scopus**)
29. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15, № 2. С. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245. (**Scopus**)
30. Баловцев С. В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8. – № 4. – С. 350–359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163. (**БАК, Scopus**)
31. Баловцев С. В., Меркулова А. М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170. (**Scopus**)