

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕМ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ МНОГОШТРЕКОВОЙ ПОДГОТОВКЕ

Е.А. Барсегян

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: barsegian.ea@misis.ru

Аннотация: Рассмотрены проблемы обеспечения метанобезопасности на выемочных участках угольных шахт при многоштрековой подготовке. Ключевым фактором риска для таких технологических схем являются неустойчивые режимы проветривания. Приведен анализ причин аварий на шахтах, который подчеркивает необходимость обновления нормативной базы проектирования вентиляции газообильных шахт с учетом обособленного разбавления метана по источникам его поступления и изолированного отвода газа, а также требований к прогнозу газовыделения. В основе расчета расхода воздуха для выемочного участка должен лежать прогноз газообильности по фактической интенсивности источников выделения метана. Отсутствие корректных методик прогноза метановыделения в настоящее время не обеспечивает требуемой точности расчетов при проектировании, в связи с чем повышается вероятность локальных скоплений газа в выработках выемочных участков. Существующие и широко применяемые для расчета шахтных вентиляционных сетей программные комплексы не содержат алгоритмов оптимизации проветривания очистных забоев в пределах сети выемочного участка. Показано, что действующие методические рекомендации по проектированию вентиляции выемочных участков требуют корректировки на основе исследований динамики газового баланса и распределения вентиляционных потоков при многоштрековой подготовке. Целью таких исследований является создание методов расчета сложных схем проветривания выемочных участков газообильных шахт, обеспечивающих устойчивое проветривание очистных забоев и минимизирующих риски загазований при сохранении высокой производительности выемочного оборудования.

Ключевые слова: вентиляция шахт, метаноопасность, многоштрековая подготовка, газовый баланс, дегазация, устойчивость проветривания, нормативная база, проектирование.

Для цитирования: Барсегян Е. А. Проблемы управления метановыделением выемочных участков угольных шахт при многоштрековой подготовке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_156.

Methane emission control in coal longwalls with multi-entry development

E.A. Barsegian

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: barsegian.ea@misis.ru

Abstract: The study focuses on methane safety in coal longwalls with multi-entry development. A key risk factor in such process flow diagrams is instability of ventilation. The analysis of causes of accidents in mines highlights the essentiality of updating the regulatory framework of ventilation design for gassy mines with regard to separate methane dilution per methane-

© Е.А. Барсегян. 2026.

sources and isolated gas withdrawal, as well as the gas emission prediction standards. The calculation basis for the air flow rate in a longwall should be gas content forecast by the actual intensity of methane emission sources. The lack of the correct procedures of gas emission prediction governs the insufficient accuracy of ventilation designs, which increases the probability of local gas accumulation in longwalls. The established software systems commonly used in mine ventilation designs lack optimization algorithms for ventilation of production faces within the longwall network. It is shown that the current guidelines on longwall ventilation design need updating based on the investigations of the gas balance dynamics and ventilation flow distribution in multi-entry development. The aim of such investigations is creation of design methods for complex ventilation diagrams for longwalls in gassy mines to ensure airflow stability at longwall faces and to minimize gas accumulation risks at the preserved high productivity of mining equipment.

Key words: mine ventilation, methane hazard, multi-entry development, gas balance, gas drainage, ventilation stability, regulatory framework, design.

For citation: Barsegian E. A. Methane emission control in coal longwalls with multi-entry development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):156-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_156.

Введение

Подземные горные работы — одна из самых тяжелых и опасных областей деятельности человека, что обусловлено совокупностью неблагоприятных производственных факторов, таких как неоднородность геологической среды и геомеханическая неустойчивость массива; риск газодинамических проявлений, наличие горючих примесей (метан, угольная пыль), вероятность внезапных выбросов и горных ударов; ограниченность пространства и путей эвакуации; воздействие вибрации, шума, пыли и других вредных веществ, а также сложность поддержания устойчивых режимов вентиляции и энергоснабжения. Добавляются также организационные и физиологические факторы: посменный характер труда, удаленность рабочих мест, большие физические нагрузки и др. Даже при развитии средств механизации и автоматизации труда базовый риск-профиль подземной добычи остается существенно выше среднего по промышленности, что требует совершенствования систем управления безопасностью, подготовки персонала и повышения качества проектных решений.

Ключевой элемент общей безопасности подземных горных работ — аэрологическая безопасность, которая определяется тем, в какой степени проектные решения по вентиляции обеспечивают устойчивое поддержание безопасных параметров атмосферы во всех выработках, в первую очередь — на выемочных участках и в тупиковых забоях. Цель вентиляции — гарантированное соблюдение предельно допустимых концентраций метана и других газов, достаточного содержания кислорода, допустимых параметров микроклимата — температуры и влажности воздуха — при любых режимах работы.

Для этого на этапе проектирования необходимо закладывать рациональную аэродинамическую схему, обеспечивающую распределение расходов воздуха в соответствии с расчетом для основных потребителей, баланс утечек (в том числе при реализации аварийных режимов), — и на этой основе выбирать оборудование для общешахтного и местного проветривания, пылеулавливания и дегазации. Именно качество этих решений определяет противоаварийную устойчивость шахты. В соответствии с

вышесказанным, предметом исследования в данной работе являются схемы проветривания выемочного участка с обособленным разбавлением метана по источникам его поступления (3-й тип), реализуемые при многоштрековой подготовке. Эти схемы являются наиболее распространенными в настоящее время, так как легко сочетаются с большинством схем и способов дегазации в целях комбинированного управления газовыделением.

Задачи и цели

Согласно данным [1], авариями, приводящими к наиболее тяжелым последствиям на угольных шахтах Российской Федерации, остаются взрывы метана и пылегазовых смесей. Проблема сохраняет актуальность на протяжении многих лет: даже при соблюдении базовых требований к проветриванию и дегазации нештатные режимы вентиляции продолжают возникать в действующих выработках [2, 3]. Характерными примерами за последние 20 лет являются аварии на шахтах «Ульяновская» (2007 г.), «Распадская» (2010 г.) [Правительство Российской Федерации]. На шахте «Распадская» произошел взрыв метана. 2010. URL: <https://archive.government.ru/eng/docs/10531/> (дата обращения: 27.09.2025)], «Северная» (2015 г.), где произошли масштабные взрывы метана и угольной пыли, сопровождавшиеся катастрофически большим количеством жертв [4]. Трагедия на шахте «Листвяжная» (2021 г.) [4 — 6] также развивалась на фоне повышенных концентраций метана, техническое расследование подтвердило критические нарушения требований промышленной безопасности и организации проветривания [Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)]. Завершено техническое расследование причин аварии на шахте «Листвяжная».

14.09.2022. URL: <https://cntr.gosnadzor.ru/news/64/4617/> (дата обращения: 27.09.2025)]. Дополнительно Следственный комитет Российской Федерации сообщил о вынесении приговора руководителям компании, что институционально подтвердило причинно-следственную связь между нарушениями, повышенным газовым фактором и последствиями аварии [Следственный комитет Российской Федерации. Доказательства, собранные Главным следственным управлением СК России, признаны судом достаточными для вынесения приговора руководителям АО ХК «СДС-Уголь» (дело о шахте «Листвяжная»). 2025. URL: <https://sledcom.ru/news/item/1964695/> (дата обращения: 27.09.2025)]. Все эти катастрофы происходили при использовании одной и той же схемы проветривания выемочного участка, которая, несмотря на свои преимущества в отношении повышения производительности забоя, характеризуется высокой уязвимостью с точки зрения устойчивости проветривания лавы; при этом нарушения проветривания приводят к формированию локальных скоплений метана как в забое, так и на примыкающих к нему выработках.

Известно, что увеличение скорости подвигания очистного забоя приводит к снижению темпов естественной дегазации угольных пластов и увеличению общей газообильности участка, в первую очередь — абсолютного газовыделения из разрабатываемого пласта, — и росту доли отбитого угля в метанообильности данного источника [7]. Это, в свою очередь, приводит к росту газовыделения в выработках, оборудованных конвейерами, за пределами выемочных участков. Также рост производительности забоя (скорости его подвигания) приводит к существенному увеличению абсолютного газовыделения из выработанного пространства. Поэтому при про-

ектировании системы вентиляции на газообильных выемочных участках предусматривается применение схем вентиляции с обособленным разбавлением метана по источникам его поступления (схемы 3-го типа по степени обособленности разбавления метана) [8], использующих для отведения исходящей струи воздуха от забоя в сторону выработанного пространства специально проведенные дополнительные выработки или трубопроводы. При этом общая газообильность распределяется по нескольким выработкам, за счет чего концентрация метана в выработках будет снижаться и, соответственно, снизится риск загазирования выработок выемочного участка.

Основное назначение вентиляции — разбавление вредностей, выделяющихся в горных выработках, до допустимых концентраций, поэтому для эффективного проветривания выемочного участка при использовании схем 3-го типа (по степени обособленности разбавления метана каждого из источников) надо знать структуру газового баланса участка — газообильность каждой выработки, чтобы соответственно распределить воздух. Однако в действующей нормативной базе отсутствуют необходимые критерии и методы расчета схем проветривания с многоштрековой подготовкой — как по прогнозу газовыделения, так и по распределению воздуха.

Таким образом, для повышения эффективности проектирования вентиляции необходимо создание новых подходов к проектированию вентиляционных и дегазационных систем, позволяющих снизить вероятность загазований и взрывов, повысить устойчивость проветривания очистных забоев и обеспечить рентабельную производительность выемочной техники [9].

Для повышения качества проектов управления метановыделением средст-

вами вентиляции необходимо решение следующих задач:

- создание надежного метода прогноза газообильности выемочных участков по источникам выделения метана, обеспечивающего достаточную для практики точность;
- разработка метода расчета оптимального распределения воздуха в сети выемочного участка, исключающего условия формирования местных скоплений метана при многоштрековой подготовке с учетом газообильности каждой выработки, в которой имеется источник газовыделения;
- разработка решений по обеспечению устойчивости проветривания очистного забоя при многоштрековой системе подготовки.

Результаты и обсуждение

Как отмечено выше, для обеспечения проектирования эффективного управления газовыделением на выемочном участке необходимо методическое обеспечение достоверного прогноза метановыделения и расчетов распределения воздуха в вентиляционной сети участка в соответствии с объемами поступления газа в каждую выработку. Но существующая нормативная база проектирования вентиляции не содержит методов расчета комплекса мероприятий по управлению метановыделением и нуждается в актуализации с учетом развития технологий добычи и повышения уровня газо- и пылевзрывоопасности, связанного с высокой производительностью очистных забоев.

Анализ методов прогноза метанообильности

В основе вентиляционных расчетов для газообильных угольных шахт лежит прогноз газообильности выработок с источниками выделения метана. И это наиболее «слабое звено» во всей цепоч-

ке проектирования вентиляции угольных шахт, поскольку ошибки в этом основополагающем расчете приводят к неадекватным результатам по определению основных параметров вентиляционных систем и выбора оборудования [7]: метанообильность является определяющим фактором при расчете необходимого расхода воздуха для проветривания основных его потребителей — добычных и проходческих участков. Отсутствие универсальных методов прогноза метановыделения — основная проблема при проектировании системы вентиляции угольных шахт. Действующее «Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт» (1975 г.) ориентировано на традиционные схемы подготовки и невысокие нагрузки на очистные забои. В нем, несмотря на наличие вариантов схем проветривания участков с многострековой подготовкой (2-го и 3-го типов), отсутствуют методы прогноза газовыделения по источникам и расчету распределения воздуха в соответствии с распределением газового баланса для таких схем.

Современные подходы к определению расчетной (прогнозной) газообильности основываются на нижеперечисленных методах.

- Прогнозирование по газоносности — основной и единственный официально принятый нормативными документами метод, в обязательном порядке используемый при проектировании вентиляции угольных шахт. Он основан на использовании геологических данных о природной и остаточной газоносности угольных пластов и вмещающих пород. Однако, как отмечается в работах [10, 11], данный подход не учитывает динамику газовыделения при современных скоростях продвижения очистных забоев. Кроме того, расчетная база основана на эмпирических зависимостях с множеством статистически определенных коэф-

фициентов, не соответствующих современным технологиям. Поэтому результаты расчетов дают слишком большую погрешность. Внесенные в последние годы изменения в методику расчета не имеют под собой экспериментального обоснования, практически они просто «подгоняют» полученный результат к достигаемым фактическим значениям или планируемой нагрузке.

- Статистические методы, включая правило «трех сигм» — применяются для оценки вероятностных характеристик газовыделения и определения расчетных нагрузок на очистные забои. Эти методы позволяют учесть изменчивость горно-геологических условий, но требуют накопления представительных статистических данных. При современных темпах продвижения изменения горно-геологических условий разработки (ускоренные темпы углубления горных работ) исключается возможность применения устаревших эмпирических формул для прогноза метановыделения, а получение новых формул становится нецелесообразным, так как все результаты будут адекватны лишь на короткий промежуток времени.

- Методы математического моделирования — наиболее современный подход, основанный на решении уравнений фильтрации и диффузии метана в угольном массиве. Он сегодня активно развивается, но пока в рамках исследовательских проектов. Как показано в работах [7, 8, 12], а также в зарубежных исследованиях [13, 14], модели, которые используют уравнения миграции газа в угольных пластах при их разгрузке, позволяют глубоко исследовать и более точно прогнозировать динамику газовыделения, учитывая физико-химические процессы, происходящие в пласте. Для реализации такого подхода используются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов

(ANSYS, COMSOL Multiphysics), а также специализированные пакеты для моделирования фильтрации газа в пористых средах. Но использование таких моделей невозможно без достоверных исходных данных, которые характеризуют фильтрационно-коллекторские свойства (проницаемость, пористость, трещиноватость) разрабатываемых пластов [12, 13, 15]. Их получение — важнейшая задача проектировщиков [16]. Для этого нужны специальные исследования, такие как проведение детальных газовоздушных съемок на выемочных участках в шахтах, бурение разведочных и дегазационных скважин, трассерные исследования и методы геофизического зондирования. И только на этой основе можно значительно улучшить точность компьютерных моделей и обеспечить возможность их практического использования для эффективного управления газовыделением [14].

Для действующих шахт прогноз газовой выделения необходим при планировании развития горных работ — т.е. проектировании новых выемочных участков. Для управления газовыделением у действующих шахт есть преимущество — возможность получения достоверной информации об объемах газовой выделения путем прямых измерений фактической газообильности выработок выемочных участков. Для этого могут быть задействованы системы мониторинга параметров атмосферы, фиксирующие динамику газовой выделения в шахте.

Для вновь проектируемых шахт решение этой проблемы также будет возможным при наличии достоверных данных о свойствах горных пород и их изменении с глубиной в привязке к горно-геологическим условиям и технологии разработки пластов, с использованием баз данных, полученных на основе накопления данных мониторинга фактической газообильности в процессе от-

работки шахтных полей действующих предприятий. В этом случае уже возможно использование статистических методов для получения адекватных результатов расчета на момент строительства шахты и ввода ее в эксплуатацию.

В то же время в «Правилах безопасности в угольных шахтах» (2020 г.), регламентирующих требования к размещению датчиков контроля метана и их минимальному количеству с точки зрения контроля аварийных концентраций метана и др. опасных газов, не предусмотрено использование телеметрического контроля газообильности участков и автоматической оценки динамики газового баланса, что не позволяет применять их для непрерывного контроля и прогноза фактического газовой выделения. Этот вопрос также необходимо решать на нормативно-техническом уровне.

На действующей шахте именно выемочные участки дают наибольший вклад в газо- и пылеопасность: здесь сосредоточены интенсивное выделение метана, образование аэрозолей угольной пыли и размещены основные рабочие места с постоянным присутствием персонала [9]. Поэтому на всех действующих угольных шахтах предусмотрена система автоматической газовой защиты (АГЗ), которая при превышении допустимого предела концентрации метана отключает цепь питания и останавливает работу всего оборудования. Данная система решает задачу аварийного отключения, но не управления газовой выделением. Так как абсолютная газообильность участка возрастает с увеличением роста нагрузки на очистной забой, отключение электропитания и остановка работы оборудования нарушает ритмичность работы оборудования, снижает темпы работы, поэтому данное обстоятельство часто приводит к злоупотреблениям со стороны персонала, связанным с искажением информации, передавае-

мой датчиками для анализа и оценки состояния атмосферы [4, 5].

Таким образом, данная система не способствует высокой производительности шахты.

Управление газовыделением на выемочном участке нельзя сводить лишь к снижению общей метанообильности лавы без учета распределения метано-воздушных потоков в сети выемочного участка. На выемочном участке суммарный приток $I_{\text{уч}}$ формируется из следующих источников: выделение газа из отбитого угля, свежееобнаженной поверхности пласта, из подрабатываемой и надрабатываемой толщи пород и объема газа, удаляемого дегазационными системами [10, 11]. Кроме того, на выемочные участки газ может привноситься поступающими струями, что следует учитывать при оценке газообильности.

Высокой эффективностью управления газовыделением на высокопроизводительных шахтах можно достичь только при слаженной работе вентиляции и дегазации. Вентиляция поддерживает метанобезопасность, обеспечивая постоянное разбавление и рассеивание газа в шахтной атмосфере по мере удаления от источника, но не снижает газообильность забоев, а также позволяет перенаправить потоки газозадушной смеси за счет их разделения и изменения направления движения утечек. Только дегазация может обеспечить извлечение и удаление метана, минуя атмосферу горных выработок, снижая тем самым газообильность до безопасного уровня. Обе системы работают с одними и теми же источниками, но разными средствами, и эффективность их относительно этих источников различна, в том числе и с точки зрения оперативности управления.

Газовый баланс выемочного участка выражается формулой

$$I_{\text{уч}} = I_{\text{об.п.}} + I_{\text{о.у.}} + I_{\text{в.п.}} + I_{\text{дег}},$$

где $I_{\text{уч}}$, $I_{\text{об.п.}}$, $I_{\text{о.у.}}$, $I_{\text{в.п.}}$, $I_{\text{дег}}$ — соответственно суммарный приток газа на выемочном участке; выделение газа с обнаженной поверхности пласта; выделение газа из отбитого угля; выделение газа из выработанного пространства; объем газа, удаляемого дегазационными системами, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Самый достоверный способ оценки интенсивности каждого из этих источников на действующих шахтах обеспечивается на основе шахтных измерений дебитов метана в горных выработках и дегазационных трубопроводах [17].

Для реализации таких схем при проектировании проветривания выемочного участка с целью обеспечения его безопасной работы необходимо установить газовый баланс участка по источникам выделения метана для более обоснованного распределения расходов по выработкам участка в соответствии с той долей газа, которая приходится на каждую воздухоподающую и отводящую выработку.

Для действующих шахт прогнозирование газовыделения должно опираться на фактически достигнутую газообильность лавы-аналога, что позволит более точно учитывать условия, при которых происходит газовыделение из каждого источника. Опираясь на данные мониторинга газового баланса, можно устанавливать зависимости, которые будут учитывать темпы продвижения очистных забоев и помогут прогнозировать газовыделение на соседних участках пласта с учетом изменения условий [8].

На рис. 1 приведена осредненная зависимость, которая должна быть построена на основе данных, полученных в режиме реального времени для каждого отработанного выемочного поля. Такие зависимости и базы данных могут быть получены при соответствующей организации систем мониторинга параметров шахтной атмосферы.

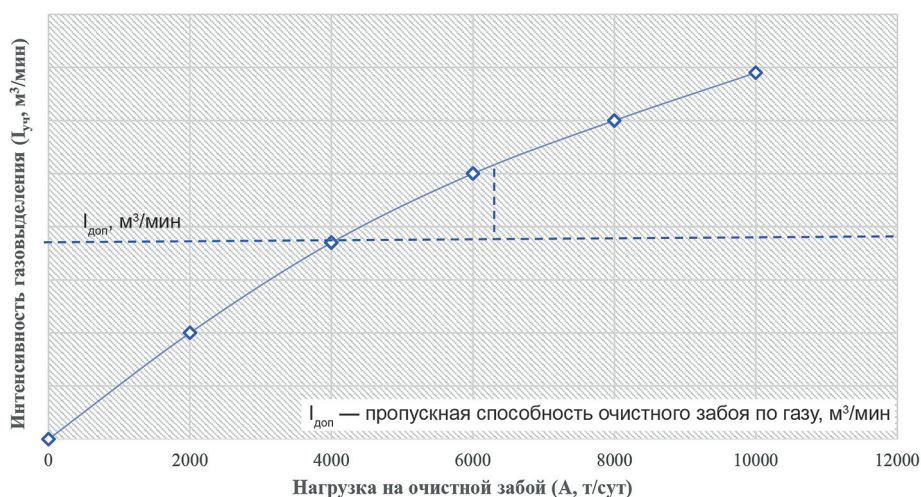


Рис. 1. Зависимость газобильности ($I_{г}$) от нагрузки на очистной забой (A)

Fig. 1. Dependence of gas flow ($I_{г}$) on the working face load (A)

Под пропускной способностью по газу понимается способность вентиляционных систем обеспечивать достаточное количество воздуха для проветривания горных выработок при соблюдении норм безопасности, регламентирующих предельное содержание метана. Для каждого выемочного поля эта характеристика индивидуальна, зависит от вынимаемой мощности пласта и типа применяемого оборудования (а также площади поперечного сечения забоя, свободного для движения воздушной струи). На графике рис. 1 четко видно, какая нагрузка является максимально допустимой для данных условий, при какой нагрузке требуется дегазация. Так, на приведенном примере видим: нагрузка на лаву без применения дегазации или изолированного отвода метана допустима только до 4000 $\text{т}/\text{сут}$. При планировании нагрузки в 6000 $\text{т}/\text{сут}$ около 30% метана необходимо удалять средствами дегазации или изолированного отвода метана.

Использование таких зависимостей позволяет не только четко определить необходимость проведения дегазации, но и оценить ориентировочно необходимый коэффициент дегазации по превышению

прогнозного значения газобильности величины пропускной способности забоя. Если при этом учесть соотношение газовыделений по каждому источнику, то можно определить, какой источник нужно дегазировать в первую очередь, чтобы получить максимальное снижение газобильности.

Аэродинамические особенности схем с многоштрековой подготовкой и методы их расчета

В современных шахтах широко используют многоштрековые системы подготовки (по две и более оконтуривающие выработки с каждой стороны лавы). Такие схемы позволяют обеспечивать высокие нагрузки на очистной забой при высокой скорости подвигания очистных забоев в условиях увеличивающейся с глубиной природной газоносности пластов, обуславливающей высокую абсолютную газобильность [18–20].

Для расчета распределения воздуха и газа в многоштрековых схемах проветривания в настоящее время используются специализированные программные комплексы. Среди отечественных разработок следует отметить программы

«Вентиляция 2.0» и «АэроСеть», позволяющие моделировать сложные вентиляционные сети с учетом утечек воздуха через выработанное пространство и взаимодействия вентиляционных потоков. Из зарубежных аналогов наиболее широко применяется пакет Ventsim, который включает модули для газодинамических расчетов и визуализации воздушнораспределения.

Однако, как показано в работах [18, 19], при многострековой подготовке схемы вентиляции оказываются неустойчивыми, что приводит к систематическому изменению расхода воздуха в очистном забое, т.е. изменению поля скоростей в сечении и условий выноса метана. Существующие программные комплек-

сы позволяют выполнить расчет для фиксированных условий, но не содержат встроенных алгоритмов оптимизации параметров сети выемочного участка и не учитывают динамику подвигания забоя (изменение аэродинамических сопротивлений элементов сети).

На рис. 2, а, б приведены схемы проветривания 3-го типа с обозначением утечек через выработанное пространство в виде интегрального потока [21] – для упрощения анализа принципиальной аэродинамической схемы.

На рис. 3, а, б приведены схемы аэродинамических соединений, соответствующие рассматриваемым вариантам схем проветривания с управлением газовыделением.

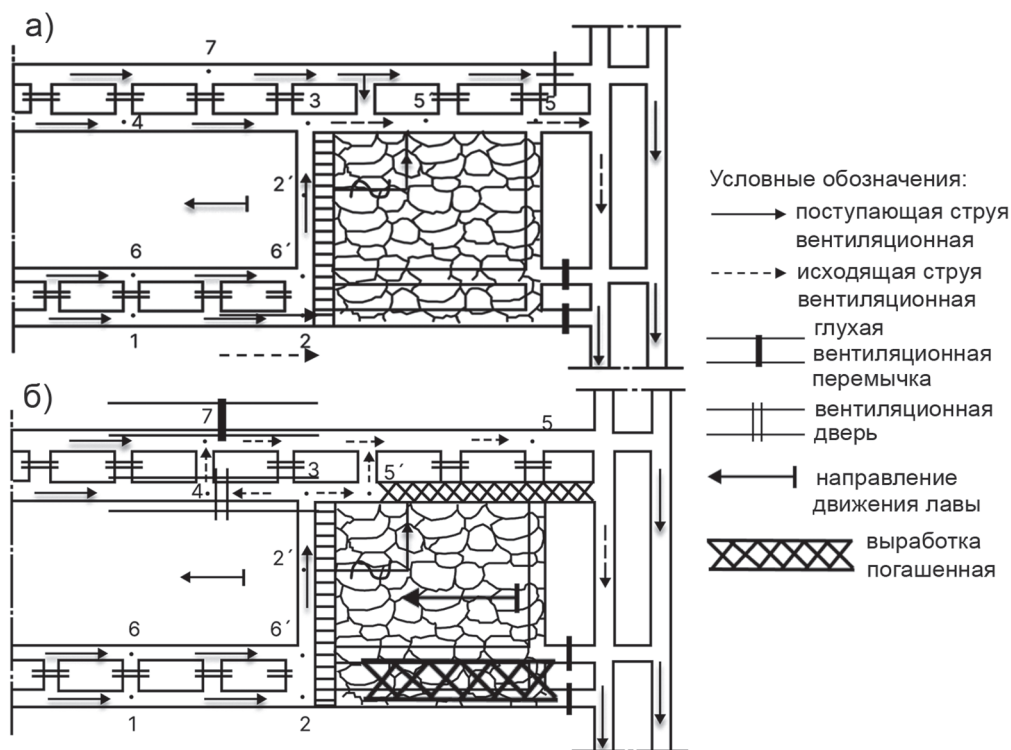


Рис. 2. Схемы проветривания выемочного участка: прямоточная с подсвежением: ветвь 2'–5' – интегральный поток утечек через выработанное пространство (а); комбинированная с подсвежением: ветвь 2'–5' – интегральный поток утечек через выработанное пространство (б)

Fig. 2. Combined ventilation schemes of the mined area: with additional supply of fresh air (branch 2'–5' – integral leakage flow through the gob area) (a); with additional supply of fresh air (branch 2'–5' – integral leakage flow through the gob area) (b)

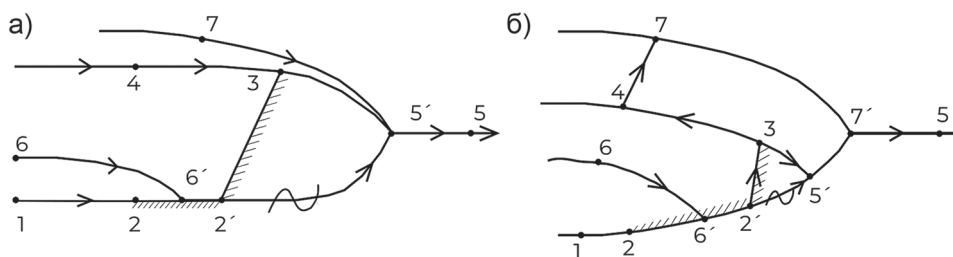


Рис. 3. Аэродинамические схемы вентиляционной сети выемочного участка: соответствующая схеме на рис. 2, а (а); соответствующая схеме на рис. 2, б (б)

Fig. 3. Aerodynamic diagrams of the ventilation network of the working area: corresponding to the diagram in Fig. 2, a (a); corresponding to the diagram in Fig. 2, b (b)

При выдаче исходящей струи на выработанное пространство очистной забой становится диагональной ветвью в вентиляционной сети участка. То есть поток воздуха, который был предназначен для забоя, частично уходит в выработанное пространство, и при достаточной интенсивности и устойчивости потока утечек, обеспечиваемого газоотсасывающим вентилятором, ветви 4–3 и 3–5 начинают влиять на расход воздуха в очистном забое, как показано на рис. 3, а, б, где ветвь 2'–5' — интегральный фильтрационный поток утечек через выработанное пространство, ветвь 2–6–2'–3 — очистной забой, ветви 1–2–6–2', 6–6', 4–3 — горизонтальные выработки.

В данном случае важно соотношение основной и подсвежающей струй: увеличение расхода подсвежающей струи по отношению к основной приводит к падению расхода и скорости на последних секциях крепи в выемочном забое. В итоге формируются условия для локальных скоплений газа на выходе из лавы.

Выемочный участок при многоштрековой подготовке представляет собой сложную аэродинамическую сеть, в которой очистной забой является диагональной ветвью, поэтому обеспечение в ней расчетного распределения потоков воздуха и их устойчивости — по мере продвижения лавы и изменения расстояния до задней сбойки — влечет за собой соответствующее изменение аэродина-

мических сопротивлений регулирующих устройств (перемычек, шлюзов) и режимов газоотсасывающих вентиляторов, что, в свою очередь, позволит исключить условия для формирования локальных скоплений газа в забое и прилегающих выработках.

Данная задача может быть решена на основе моделирования вентиляционной сети участка для исследования закономерностей распределения воздуха в ней при многоштрековой подготовке выемочных участков с применением современных программных комплексов, адаптированных для решения оптимизационных задач.

Выводы

1. Действующая нормативная база проектирования вентиляции угольных шахт не учитывает в полной мере современные технологии добычи и использование многоштрековых схем подготовки. Выявлены следующие ограничения: отсутствие требований к автоматическому контролю фактической газообильности, отсутствие методик учета газового баланса, недостаточная регламентация применения методов прогноза газовыделения, отсутствие подходов к расчету устойчивости проветривания в сложных аэродинамических сетях выемочных участков.

2. Существующие методы прогнозирования газообильности не обеспечи-

вают требуемой точности для условий высоких нагрузок на очистные забои при многострековой подготовке и комбинированных способах управления газовыделением с изолированным отводом метана из выработанного пространства. Наиболее перспективным направлением является компьютерное моделирование процесса десорбции метана из угольного массива, однако его применение ограничивается отсутствием достоверных данных о фильтрационно-коллекторских свойствах пластов, которые в штатном порядке геологами не определяются.

3. Для прогнозирования выделения метана в выработки действующих шахт наиболее точные результаты могут быть получены на основе мониторинга фактической газообильности, учитывающего динамику газового баланса, что позволит создать достоверную базу данных для разрабатываемых пластов. Использование компьютерного моделирования в интеграции с системами мониторинга параметров атмосферы для более точной оценки динамики газовыделения в шахте даст возможность обеспечить адекватное управление газовыделением для любых применяемых схем проветривания и дегазации.

4. Для расчета распределения воздуха и газа в многострековых схемах

существуют специализированные программные комплексы («Вентиляция 2.0», «АэроСеть», Ventsim), однако они не содержат встроенных алгоритмов оптимизации параметров сложных сетей выемочных участков с учетом динамики подвигания забоя, что не дает возможности рассчитывать условия поддержания параметров устойчивого проветривания очистных забоев.

5. Ключевым фактором риска при многострековой подготовке является неустойчивость проветривания, обусловленная тем, что очистной забой становится диагональной ветвью вентиляционной сети участка, включающей выработанное пространство. Критически важным параметром выступает соотношение расходов воздуха основной и подсвежающей струй, определяющее условия выноса метана из призабойного пространства.

6. Разработка алгоритмов расчета для схем проветривания выемочных участков с управлением метановыделением, обеспечивающих рациональное распределение воздуха в сети выработок выемочного участка и стабильность расхода воздуха в очистном забое, является одной из главных задач совершенствования нормативной базы проектирования вентиляции угольных шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин Н. М., Ермаков А. Ю., Сенкус Вал. В. Аэрогазодинамика очистных и подготовительных участков при отработке мощных пологих пластов. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2017. — 288 с.
2. Золотухин В. А., Ширшев Л. Г., Борисов А. В. Повышение безопасности ведения горных работ в метанугольных условиях на основе анализа аварийности // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 6. — С. 45–51.
3. Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 623–632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
4. Каледина Н. О., Мещеряков Д. А., Малашкина В. А. Выделение метана из почвы как фактор формирования локальных скоплений в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2026. — № 2. — С. 29–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2026-2-29-36.
5. Борисов А. В., Ширшев Л. Г., Кабанов Е. И., Мяков В. В. Анализ причин аварии на шахте «Листвяжная» (Кемеровская область) в 2021 году и предложения по повышению безопасности

в угольной промышленности // Горный журнал. — 2022. — № 7. — С. 43–50. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.07.

6. Недашковская П. А., Иванов Д. С. Правовые и организационные аспекты ответственности руководства за аварии на опасных производственных объектах (на примере шахты «Листвяжная») // Безопасность в техносфере. — 2025. — Т. 14. — № 2. — С. 112–121. DOI: 10.32334/2413-3845-2025-14-2-112-121.

7. Biswal P. K., Parida D., Mishra G., Sahoo A. K. Study of air flow pattern in mine model gallery and its validation using CFD modeling // WSN. 2019, vol. 130, pp. 1–24.

8. Бобин В. А., Бобина Е. В. Математическое моделирование процессов газовыделения в угольных шахтах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 88–97.

9. Кузнецов В. П. Моделирование газовыделения в угольных шахтах. — Екатеринбург: УГУ, 2017. — 156 с.

10. Бабенко А. Г., Лапин С. Э. Система газоаналитическая шахтная многофункциональная «Микон 1Р» — основа построения систем контроля и управления угольных шахт // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 4. — С. 32–38. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-4-32-38.

11. Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., Wasilewski S. Methodology for determining methane distribution in a longwall district // Archives of Mining Sciences. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 467–485. DOI: 10.24425/ams.2019.129363.

12. Золотых С. С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. — 2019. — № 5. — С. 18–22. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-5-18-22.

13. Тайлаков О. В., Макеев М. П., Уткаев Е. А., Застрелов Д. Н. Полуэмпирическая модель газовыделения из угольного пласта на основе изучения коллекторских свойств углепородного массива // Горный журнал. — 2024. — № 6. — С. 78–85.

14. Molochkov A. K. Methods for improving safety in coal mines: Ventilation and degassing. Moscow: Nedra, 1992, 256 p.

15. Liu Y., Guo H. Ventilation design optimization for multi-branch coal mining workings under high methane conditions // Safety Science. 2018, vol. 110, pp. 212–221.

16. Karacan C. Ö., Martín-Fernández J. A., Ruppert L. F., Olea R. A. Insights on the characteristics and sources of gas from an underground coal mine using compositional data analysis // International Journal of Coal Geology. 2021, vol. 241, article 103767. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103767.

17. Li X., Zhang H., Wang J. Numerical simulation of methane distribution in multi-entry coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, no. 5, pp. 805–811.

18. Каледина Н. О., Чечель К. Н. Анализ газового баланса выемочного участка в обеспечении аэрологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10-1. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.

19. Meyer Varicon C. F. Advancing the technology of methane monitoring on a continuous miner // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa. 2018, vol. 71, no. 3, pp. 12–20.

20. Пучков Л. А. Аэродинамика подземных выработанных пространств. — М.: Изд-во МГГУ, 1993. — 266 с.

21. Li Juanjuan, Hu Mingshun, Ding Enjie, Kong Wei, Pan Dongming, Chen Shen Multi-parameter numerical simulation of dynamic monitoring of rock deformation in deep mining // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, no. 5, pp. 851–855. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.044. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kachurin N. M., Ermakov A. Yu., Senkus Val. V. *Aerogazodinamika ochistnykh i podgotovitel'nykh uchastkov pri otrabotke moshchnykh pologikh plastov* [Aerogasodynamics of longwall faces and development sections during extraction of thick flat-lying seams], Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 2017, 288 p.

2. Zolotukhin V. A., Shirshov L. G., Borisov A. V. Improving safety of mining operations in methane-coal conditions based on accident analysis. *Occupational Safety in Industry*. 2018, no. 6, pp. 45–51. [In Russ].

3. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Yu., Zaitsev A. V. Automated ventilation control in mines and underground workings: Problems, current experience, and directions for improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623–632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

4. Kaledina N. O., Meshcheryakov D. A., Malashkina V. A. Methane emission from the floor as a factor in the formation of local accumulations in the production faces of coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2026, no. 2, pp. 29–36. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2026-2-29-36.

5. Borisov A. V., Shirshov L. G., Kabanov E. I., Myakov V. V. Analysis of the causes of the accident at the Listvyazhnaya mine (Kemerovo Region) in 2021 and proposals for improving safety in the coal industry. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 7, pp. 43 – 50. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.07.
6. Nedashkovskaya P. A., Ivanov D. S. Legal and organizational aspects of management responsibility for accidents at hazardous production facilities (case study of the Listvyazhnaya mine). *Safety in technology*. 2025, vol. 14, no. 2, pp. 112 – 121. [In Russ]. DOI: 10.32334/2413-3845-2025-14-2-112-121.
7. Biswal P. K., Parida D., Mishra G., Sahoo A. K. Study of air flow pattern in mine model gallery and its validation using CFD modeling. *WSN*. 2019, vol. 130, pp. 1 – 24.
8. Bobin V. A., Bobina E. V. Mathematical modeling of gas emission processes in coal mines. *Journal of Mining Sciences*. 2020, no. 3, pp. 88 – 97. [In Russ].
9. Kuznetsov V. P. *Modelirovanie gazovydeleniya v ugol'nykh shakhtakh* [Modeling of gas emission in coal mines], Ekaterinburg, 2017, 156 p.
10. Babenko A. G., Lapin S. E. The multifunctional mine gas-analytical system «Mikon 1R» as a basis for constructing control and management systems for coal mines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019, no. 4, pp. 32 – 38. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-4-32-38.
11. Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., Wasilewski S. Methodology for determining methane distribution in a longwall district. *Archives of Mining Sciences*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 467 – 485. DOI: 10.24425/ams.2019.129363.
12. Zolotykh S. S. Preliminary degasification of coal seams as a factor in improving safety at Kuzbass mines. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 5, pp. 18 – 22. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-5-18-22.
13. Tailakov O. V., Makeev M. P., Utkaev E. A., Zastrelov D. N. Semi-empirical model of gas emission from a coal seam based on the study of reservoir properties of the coal-rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 6, pp. 78 – 85. [In Russ].
14. Molochkov A. K. *Methods for improving safety in coal mines: Ventilation and degassing*. Moscow: Nedra, 1992, 256 p.
15. Liu Y., Guo H. Ventilation design optimization for multi-branch coal mining workings under high methane conditions. *Safety Science*. 2018, vol. 110, pp. 212 – 221.
16. Karacan C. Ö., Martín-Fernández J. A., Ruppert L. F., Olea R. A. Insights on the characteristics and sources of gas from an underground coal mine using compositional data analysis. *International Journal of Coal Geology*. 2021, vol. 241, article 103767. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103767.
17. Li X., Zhang H., Wang J. Numerical simulation of methane distribution in multi-entry coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, no. 5, pp. 805 – 811.
18. Kaledina N. O., Chechel K. N. Analysis of the gas balance of the exhaust area in ensuring aerological security. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10-1, pp. 5 – 16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.
19. Meyer Varicon C. F. Advancing the technology of methane monitoring on a continuous miner. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*. 2018, vol. 71, no. 3, pp. 12 – 20.
20. Puchkov L. A. *Aerodinamika podzemnykh vyrabotannykh prostranstv* [Aerodynamics of underground mined-out spaces], Moscow, Izd-vo MGGU, 1993, 266 p.
21. Li Juanjuan, Hu Mingshun, Ding Enjie, Kong Wei, Pan Dongming, Chen Shenan Multi-parameter numerical simulation of dynamic monitoring of rock deformation in deep mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, no. 5, pp. 851 – 855. DOI: 10.1016/j.ijm. st.2016.05.044.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барсегян Евгине Агасиевна — аспирант, НИТУ МИСИС,
e-mail: barsegian.ea@misis.ru, ORCID: 0009-0005-0209-7971.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

E.A. Barsegian, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
e-mail: barsegian.ea@misis.ru, ORCID: 0009-0005-0209-7971.

Получена редакцией 20.11.2025; получена после рецензии 09.06.2026; принята к печати 10.10.2026.
Received by the editors 20.11.2025; received after the review 09.06.2026; accepted for printing 10.10.2026.