

Комплексный метод по совершенствованию управления газовойделением при ведении горных работ

Е.Н. Козырева ✉, М.С. Плаксин, Р.И. Родин, М.В. Шинкевич, А.А. Рябцев

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация

✉Kozyrevaen@ic.sbras.ru

Резюме: В статье представлены методы, комплексное применение которых направлено на совершенствование управления газовойделением при ведении подземных горных работ. Разработанные методы базируются на классических законах газодинамики и геомеханики и дополнены результатами, полученными при проведении фундаментальных исследований в области газокинетической реакции газоносных угольных пластов на технологическое воздействие. Комплексность заключается в совместном применении методов по определению газокинетических свойств, газоносности и газодинамической активности угольного пласта, методов прогноза и контроля метанообильности подготовительных выработок, очистных забоев и выемочных участков. Применение методов направлено на решение горнотехнологических задач шахт с целью обеспечения безопасных (по газовому фактору) режимов работы забоев в условиях изменчивости свойств угольных пластов и состояний массива горных пород при техногенном воздействии и с учётом условий проведения выработок.

Ключевые слова: угольный пласт, подготовительная выработка, выемочный участок, метод, геомеханические процессы, неравномерность газовойделение, прогноз метанообильности, управление газовойделением

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. №АА-АА-А21-121012290020-4).

Для цитирования: Козырева Е.Н., Плаксин М.С., Родин Р.И., Шинкевич М.В., Рябцев А.А. Комплексный метод по совершенствованию управления газовойделением при ведении горных работ. *Горная промышленность*. 2023;(S2):18–25. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-18-25>

Comprehensive method to improve gas emission management during mining operations

E.N. Kozyreva ✉, M.S. Plaksin, M.V. Shinkevich, R.I. Rodin, A.A. Ryabtsev

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation

✉Kozyrevaen@ic.sbras.ru

Abstract: This article presents methods, the integrated application of which is aimed at improving the management of gas emission during underground mining operations. The developed methods are based on the classical laws of gas dynamics and geomechanics, and are supplemented by the results obtained during fundamental research in gas kinetic reaction of gas-bearing coal beds to technological impact. The integrated character is explained by joint application of methods to determine gas-kinetic properties, gas-bearing and gas-dynamic activity of coal seam, methods to predict and monitor methane mobility in the development workings, production faces and mining areas. Application of these methods is aimed at solving mining and technological problems of mines in order to ensure safe operating modes of production faces in terms of the gas factor in conditions of variability of coal bed properties and the state of the rock mass under man-made impact with account for mining and technological conditions.

Keywords: coal seam, development working, mining area, method, geomechanical processes, non-uniformity of gas release, forecast of methane mobility, gas release management

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0001 'Creation of multipurpose systems for monitoring and forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits' (Reg. No.AAA-A-A21-121012290020-4).

For citation: Kozyreva E.N., Plaksin M.S., Shinkevich M.V., Rodin R.I., Ryabtsev A.A. Comprehensive method to improve gas emission management during mining operations. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):18–25. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-18-25>

Введение

Подземная добыча угля при выемке пласта вызывает разгрузку массива горных пород и, как следствие, интенсивные потоки газа из обрабатываемого пласта и пластов-спутников. Современные технологии угледобычи подразумевают выемочные столбы большой площади и высокие скорости подвигания очистных и подготовительных забоев. Это приводит к увеличению неравномерности газовыделения в виде амплитудных колебаний. В таких условиях увеличивается острота газового фактора, требующая совершенствования подходов к расчету параметров газовыделения, геомеханических процессов в массиве и комплекса мероприятий по снижению газовой опасности, например, дегазации обрабатываемого пласта и пластов-спутников, повышение её эффективности, обеспечение максимально допустимой нагрузки на выработку. Ситуация требует незамедлительного принятия мер, направленных на принятие более качественных и обоснованных инженерных решений о порядке планирования и развития горных работ, их научно-технического и нормативно-методического обеспечения.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН по этому направлению ведутся научные исследования: от регионального прогноза газодинамической активности пластов по геологоразведочным данным перед началом ведения горных работ до систематического определения технологической газоносности – фактического содержания газа в пласте в зонах ведения горных работ, а также прогноза и контроля газодинамических явлений на интервалах подвигания очистных и подготовительных забоев и разработки рекомендаций по повышению эффективности управления газовыделением.

Результатами исследований и сотрудничества с научными коллективами РАН и СО РАН, а также с угольными предприятиями стали разработанные авторами статьи методы с общей направленностью на снижение газовой опасности.

Описание разработанных методов

Созданы основы метода определения газокинетических свойств угольного пласта как в природных условиях, так и в процессе его отработки, имеющего огромное значение для повышения уровня безопасности при ведении горных работ. Метод в своей физической основе базируется на результатах исследований процессов адсорбции и десорбции газов в угле и их влияния на механические свойства пластов вследствие перераспределения напряжений в массиве [1–6]. В качестве технической основы метода служит разработанное и изготовленное специальное устройство для оперативного определения газоносности угольного пласта с возможностью отбора проб угольного штыба в изолированном (от атмосферы выработки) режиме [7]. Аналитическими и практическими экспериментами по определению количества метана выявлены отличительные характеристики газоносного (природного) и искусственно (в лабораторных условиях) насыщенного газом угля, что указывает на особое (растворенное) состояние метана в угольном пласте. Применение инновационного специального устройства позволяет оценивать изменения газоносности пласта по линии от забоя до зоны геостатических напряжений при проведении подготовительных выработок.

Управление геомеханическим состоянием угольного

пласта и вмещающих пород кровли сводится к установлению закономерностей процессов, протекающих в окружающем породном массиве вследствие непрерывного подвигания забоя [8–10]. По результатам проведенных в этой области исследований разработана параметрическая модель геомеханической структуризации углегазонасного массива при ведении подземных горных работ. Преимущество модели относится к описанию механизма волнообразных геомеханических процессов в массиве, прилегающем к угольному пласту, обрабатываемом длинным очистным забоем, и расчету параметров этих процессов в зависимости от длины очистного забоя, глубины залегания пласта, средневзвешенного модуля упругости пород в каждом геомеханическом слое. Модель определяет формирование сводов n -х уровней иерархии – образование параболических поверхностей в основании которых лежат окружности, и порядок их развития – переходы от одного уровня иерархии к другому по мере подвигания забоя и развития зон разгрузки массива, в пределах которых снижается газодинамический потенциал, определяющий динамику метанообильности забоя.

Разработан метод определения параметров газовыделения из угольных пластов при движении очистных и подготовительных забоев. При его разработке использованы эмпирические методы исследования, основанные на современных достижениях нелинейной геомеханики в области деформационно-волновой природы геомеханических процессов в окрестности выработок, уточняющие закономерности классической геомеханики, и современные знания о свойствах органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов. Применена следующая методология выполнения работы. Определение основных параметров нелинейных геомеханических процессов в углегазонасном массиве горных пород (сводообразование и формирование геомеханических слоев) в окрестности действующих забоев. Расчет газоносности в подрабатываемых и надрабатываемых сближенных пластах и метановыделения из них с учетом нелинейных геомеханических процессов. Дифференциация структуры газоносности обрабатываемого пласта и метановыделения из него в зависимости от действующих напряжений (литологического и гидростатического давлений) в зонах газового дренирования и опережающей разгрузки при движении очистного и подготовительного забоев.

Пример структуры газоносности пласта по формам существования метана в зонах газового дренирования и опережающей разгрузки при скорости подвигания 1 м/сут представлен на рис. 1.

Созданы научные основы метода, позволяющего комплексировать свойства углей, газосодержание (при постоянных напряжениях), характер газовыделения (при снижении напряжений) в условиях техногенной нелинейной структуризации массива с целью заблаговременного, до начала ведения горных работ, расчета безопасных по газовому фактору технологических параметров подготовительных и очистных забоев, обрабатывающих пологие пласты с полным обрушением кровли, и оперативного уточнения режимов их работы. Получен комплексный показатель, отражающий взаимосвязь горно-геологических, газокинетических свойств углей, протяженности подготовительных выработок и геометрических размеров выемочных участков, их производительности и трудозатрат на обеспечение безопасности горных работ (рис. 2).

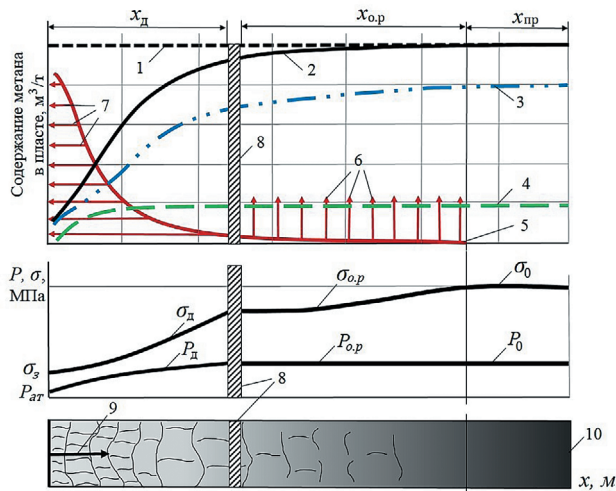


Рис. 1
 Схема напряженно-деформированного состояния угольного пласта и структура газоносности по формам существования метана в пласте впереди движущегося очистного забоя (пример лавы на Чертинском месторождении Кузбасса):
 1 – природная газоносность, м³/т;
 2 – расчетная газоносность без учета свободного метана, м³/т;
 3 – растворенный метан, м³/т;
 4 – сорбированный метан, м³/т;
 5 – свободный метан, м³/т;
 6 – переток метана через породы кровли, м³/т;
 7 – метановыделение через плоскость забоя, м³/т;
 8 – зона опорного давления;
 9 – направление движения забоя;
 10 – пласт угля;
 x – расстояние от призабойной части пласта вглубь массива, м;
 x_d – зона газового дренирования, м;
 $x_{o,p}$ – зона опережающей разгрузки, м;
 x_{pr} – зона природных напряжений, равных $(\sigma_0 + P_0)$, м;
 σ_0 – литологическое давление вне зоны влияния выработки, МПа;
 P_0 – гидростатическое давление вне зоны влияния выработки, МПа;
 $\sigma_a, \sigma_d, \sigma_{o,p}$ – литологическое давление на кромке забоя, в зоне газового дренирования, в зоне опережающей разгрузки соответственно, МПа;
 $P_{at}, P_d, P_{o,p}$ – атмосферное давление, внутрипластовое давление газа в зоне газового дренирования, в зоне опережающей разгрузки соответственно, МПа

Fig. 1
 Diagram of the stress-and-strain state of the coal seam and the structure of gas content by the forms of methane existence in the formation ahead of the advancing face (example of the longwall face at the Chertinskoye field of Kuzbass):
 1 – natural gas content, м³/т;
 2 – calculated gas content excluding free methane, м³/т;
 3 – dissolved methane, м³/т;
 4 – sorbed methane, м³/т;
 5 – free methane, м³/т;
 6 – methane crossflow through the roof rocks, м³/т;
 7 – methane emission through the face plane, м³/т;
 8 – zone of the reference pressure;
 9 – direction of the face advance;
 10 – coal seam;
 x – distance from the near-face part of the seam deeper into the rock mass, м;
 x_d – zone of gas drainage, м;
 $x_{o,p}$ – zone of advance distressing, м;
 x_{pr} – zone of natural stresses equal to $(\sigma_0 + P_0)$, м;
 σ_0 – lithologic pressure outside of the impact zone of the mine workings, МПа;
 P_0 – hydrostatic pressure outside the impact zone of the mine workings;
 $\sigma_a, \sigma_d, \sigma_{o,p}$ – lithologic pressure at the stope heel, in the zone of gas drainage, in the zone of advanced distressing, respectively, МПа;
 $P_{at}, P_d, P_{o,p}$ – atmospheric pressure, gas pore pressure in the gas drainage zone, in the advanced unloading zone, respectively, МПа

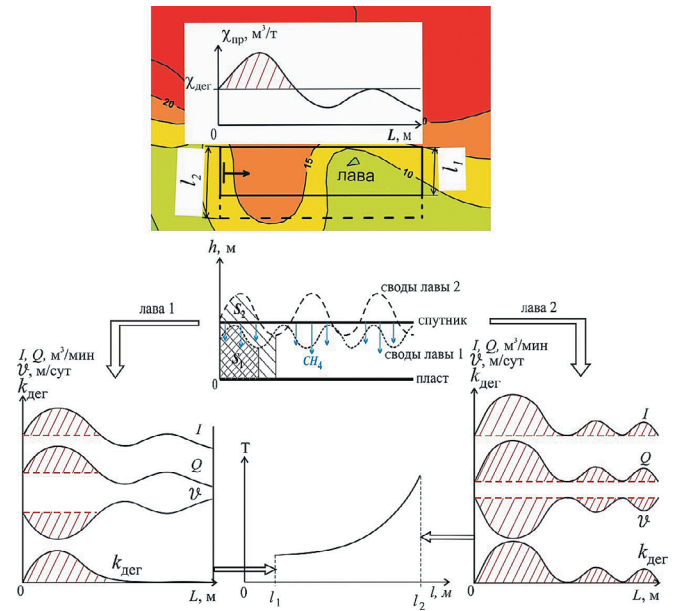


Рис. 2
 Схема к обоснованию безопасных (по газовому фактору) технологических параметров и оперативного уточнения режимов работы забоев:
 $\chi_{пр}$ – природная газоносность пласта (газосодержание), м³/т;
 $\chi_{дег}$ – газоносность пласта, превышение которой (согласно ПБ) требует применения дегазации, м³/т;
 L – длина выемочного столба, м;
 l_1, l_2 – длина лавы 1, 2 соответственно ($l_1 > l_2$), м;
 h – высота сводов в зоне разгрузки массива, м;
 S_1, S_2 – удельная (на 1 м длины лавы) площадь массива (в вертикальном сечении), попадающего в зону разгрузки лавы 1, 2, м²;
 I – абсолютная метанообильность выработки, м³/мин;
 Q – расход воздуха для проветривания выработки, м³/мин;
 v – скорость подвигания выработки, м/сут;
 $k_{дег}$ – необходимый коэффициент дегазации;
 T – комплексный показатель

Fig. 2
 Diagram for justification of the safe process parameters (in terms of the gas factor) and operational refinement of the stope operation modes:
 $\chi_{пр}$ – natural gas content of the seam, м³/т;
 $\chi_{дег}$ – gas content of the seam, exceeding of which (according to the safety regulations) requires degassing, м³/т;
 L – length of the extraction panel, м;
 l_1, l_2 – length of the longwall face 1, 2, respectively, ($l_1 > l_2$), м;
 h – heights of roofs in the rock mass distressing zone, м;
 S_1, S_2 – specific (per 1 m of the longwall face length) area of the rock mass (in vertical cross-section) located within the distressing zone of longwall faces 1, 2, м²;
 I – absolute methane yield of the mine working, м³/мин;
 Q – air rate for ventilation of the mine working, м³/мин;
 v – face advance rate, м/day;
 $k_{дег}$ – required degassing coefficient;
 T – complex index

Ведутся многочисленные исследования по объяснению причин, условий происхождения и механизма реализации различных газодинамических явлений (ГДЯ) при техногенном воздействии на углепородный массив в ходе ведения подземных горных работ и исследования по снижению газовой опасности на угледобывающих предприятиях, в том числе путем предотвращения опасных ГДЯ [11–14].

Разработаны методы регионального и локального прогнозов и основы автоматизированного текущего контроля уровней газодинамической активности угольных пластов при проведении подготовительных выработок. В основе всех видов газопроявлений лежит общий физический процесс выделения из массива потенциальной энергии. Потенциальная способность угольного пласта к саморазрушению при техногенном воздействии за счет энергии содержащегося в нем газа определяется как газодинамическая активность угольного пласта. Реализация указанных методов прогноза и контроля уровней газодинамической активности угольных пластов заключается в следующем. Выполняется расчет уровней потенциальной газодинамической активности угольного пласта по геологоразведочным данным о их свойствах; затем – зонирование уголь-

Таблица 1
Показатели и уровни газодинамической опасности и активности угольных пластов

Table 1
Indicators and levels of gas dynamic hazard and activity of coal seams

Показатель газодинамической активности E , кДж/кг		Номер уровня	Номер уровня		Вид газопроявлений
деструкции P_d , м ² /кг			опасности пласта	активности пласта	
0–20	0–2,6	1	0–20	0–2,6	Метанообильность шахт и участков Средний
20–40	2,6–4,6				
20–40	2,6–4,6	2	Газодинамический	Средний	Высыпания, выдавливания угля с повышенным метановыделением, слабые внезапные выбросы
> 100	>9,8				

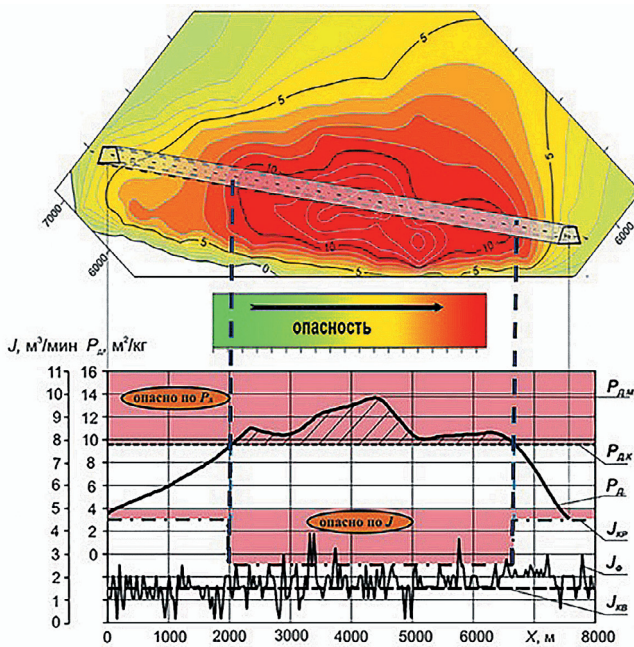


Рис. 3
Основы метода автоматизированного текущего контроля газодинамической активности угольных пластов при проведении подготовительных выработок на основе данных регионального и локального прогнозов:
 $P_{дк} = 9,8$ – критический уровень показателя газодинамической деструкции, м²/кг;
 $P_{дм}$ – максимальная величина показателя P_d , превышающая $P_{дк}$, м²/кг;
 P_d – показатель газодинамической деструкции по трассе выработки, м²/кг;
 $J_{кр}$ – критический уровень метанообильности, м³/мин;
 $J_ф$ – фактическая метанообильность, м³/мин;
 $J_{кв}$ – квазистатическая метанообильность, м³/мин

Fig. 3
Fundamentals of the method of automated monitoring of gas-dynamic activity of coal seams while driving development workings based on regional and local forecasts:
 $P_{дк} = 9.8$ – a critical level of gas dynamic destruction indicator, m²/kg;
 $P_{дм}$ – the maximum value of the P_d indicator, that exceeds $P_{дк}$, m²/kg;
 P_d – the gas dynamic destruction indicator along the mine working, m²/kg;
 $J_{кр}$ – a critical level of methane content, m³/min;
 $J_ф$ – the actual methane content, m³/min;
 $J_{кв}$ – the quasi-static methane content, m³/min

ных пластов по уровням их опасности и газодинамической активности; далее – построение соответствующих карт и нанесение на карту трассы проведения подготовительной выработки.

Установлено, что энергия газа E , реализующаяся из угольного пласта в процессе техногенного воздействия на него, определяется в зависимости от газоносности пласта и константы метаноносности. А в зависимости от этих параметров определяется обобщающий показатель P_d газодинамических следствий разгрузки (деструкции) угольных пластов от горного давления. Количественные значения показателей E и P_d представлены в табл. 1. Они получены из анализа 197 случаев различного вида газопроявлений, произошедших в Кузнецком, Печерском и Карагандинском бассейне за период с 1943 г. по настоящее время. Установлено, что при $E > 100$ кДж/кг или при $P_d > 9,8$ м²/кг, являющимися критическими значениями, уровень газодинамической активности пласта повышается до «высокого» с такими видами газопроявлений, как внезапные выбросы угля, породы и газа значительной силы. В случае если горные работы планируется проводить в зоне с высоким уровнем опасности, необходимо применять мероприятия по его снижению до среднего или слабого. Снижение и контроль газодинамической активности пласта по трассе выработки достигаются управлением ее метанообильностью.

Оперативно определять уровень газодинамической активности пласта при проведении подготовительной выработки можно по отношению фактической метанообильности выработки $J_ф$ к ее квазистатической (среднесуточной) метанообильности $J_{кв}$. Этим отношением является критический уровень метанообильности $J_{кр}$, при превышении которого возрастает вероятность проявления газодинамических явлений с учетом оценки склонности угля к саморазрушению, как показана зона «опасно по J » на рис. 3.

Практическое применение полученных результатов

Применение параметрической модели в конкретных горнотехнологических условиях позволяет рассчитывать параметры геомеханической структуризации массива горных пород при движении очистного забоя и определять интервалы, потенциально опасные с точки зрения повы-

шенного напряженного состояния пород, причем как по площади выемочного столба, так и по длине выработок, и исключать негативное влияние горного давления при определении размеров выемочного участка и местоположения выработок.

Мероприятия по снижению негативного влияния горного давления необходимо проводить по контурам формирующихся сводов для минимизации энергетических затрат на разрушение пород. При проектировании таких элементов, как промежуточные печи и демонтажная камера, при выборе мест остановки комплексов на профилактические работы необходимо выбирать их расположение по длине выемочного столба в местах с наименьшим воздействием горного давления. Необходимо принимать во внимание вложенность сводов и оптимизировать длину очистного забоя для конкретных условий, так как несоблюдение вложенности может вызвать зависание пород кровли и повышенное давление на крепь лавы. Для снижения горного давления впереди очистного забоя на вентиляционные ходки и демонтажную камеру они должны проводиться на расстояниях от монтажной камеры, кратных длине очистного забоя, а также длина выемочного столба должна приниматься кратной длине очистного забоя.

В качестве практического применения метода определения параметров газовыделения из угольных пластов на рис. 4 и 5 представлены результаты расчета метанообильности при движении очистных забоев. Удовлетворительная

сходимость значений позволяет заключить, что применение параметрической модели и разработанного алгоритма расчета дает возможность прогнозировать метановыделение на выемочный участок из основных источников адекватно конкретным горно-геологическим особенностям горного блока и его техногенной структуризации.

Для практического применения полученных результатов регионального прогноза и текущего контроля газодинамической активности угольных пластов обоснованы параметры оперативного метода управления газодинамической реакцией угольного пласта при проведении подготовительной выработки по фактическим данным о её метанообильности и на основании зональной дезинтеграции пород в приконтурной части массива. Получено выражение для расчета зоны в призабойной части пласта от оси выработки, требующей снижения газодинамического потенциала:

$$\tau_n = \frac{1}{2} \left(0,56\sqrt{S_e} + X_m \left((\sqrt{2})^{n-1} + (\sqrt{2})^n \right) \right), \text{ при } n = 1, 2, 3 \dots N,$$

где τ_n – расстояние от оси выработки до зоны дезинтеграции пласта, м; S_e – площадь сечения выработки, м²; X_m – расстояние от кромки пласта до области максимальных напряжений, м; n – уровень структурной иерархии.

На основании этой зависимости уточняются параметры технологий снижения газодинамической опасности при проведении подготовительной выработки (рис. 6): длина

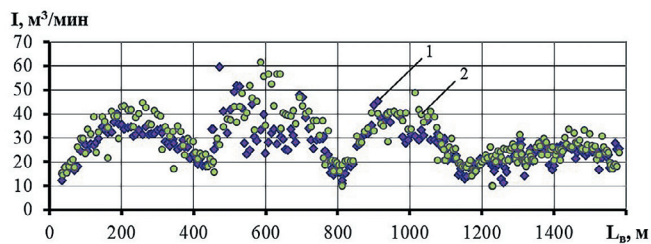


Рис. 4
Фактические и расчетные значения абсолютной метанообильности по длине выемочного столба:
1 – фактические значения;
2 – расчетные значения (по параметрической модели)

Fig. 4
Actual and design values of absolute methane mobility along the length of the extraction panel:
1 – actual values,
2 – calculated values (using a parametric model)

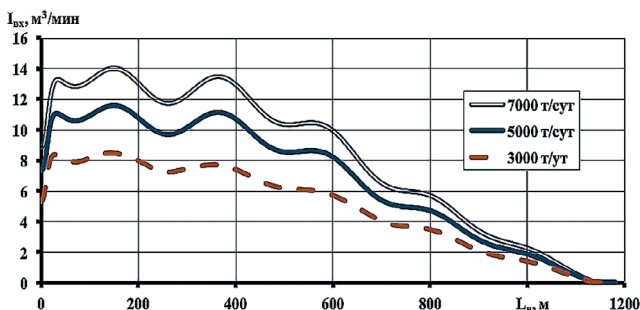


Рис. 5
Абсолютная метанообильность из отбитого угля, транспортируемого по конвейерному штрелу, при различных нагрузках

Fig. 5
Absolute methane content in loose coal transported along the conveyor drift at different loads

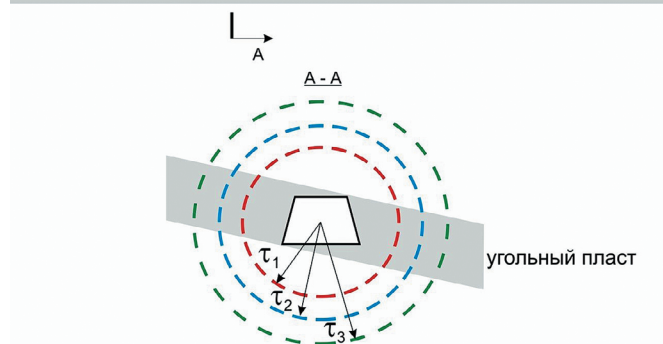
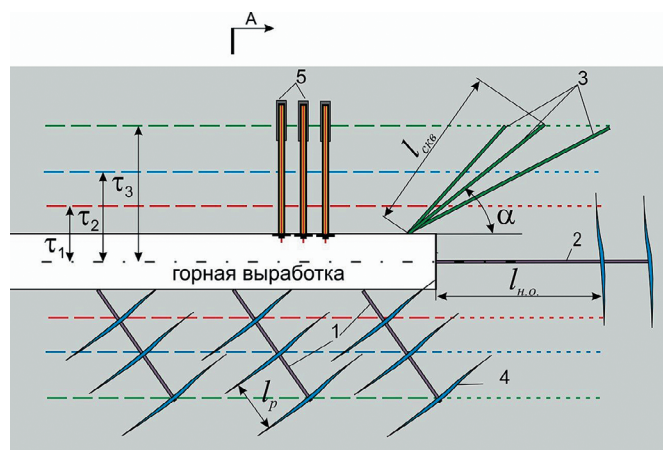


Рис. 6
Схема мероприятий по снижению газодинамической опасности при проведении подготовительной выработки:
1 – скважины гидроразрыва в борт выработки;
2 – скважина забойная;
3 – сеть дегазационных скважин;
4 – щель гидроразрыва;
5 – анкерное крепление

Fig. 6
Gas hazard mitigation plan while driving the development working:
1 – hydrofrac boreholes in the working wall;
2 – a stope borehole;
3 – a network of degassing boreholes;
4 – a hydrofrac split;
5 – rock bolting

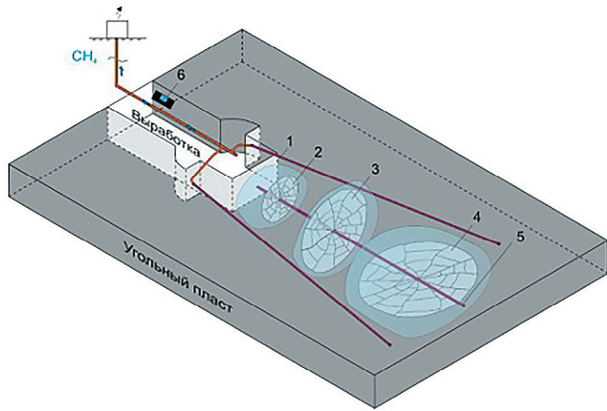


Рис. 7
Схема применения мероприятий по снижению газовой и газодинамической опасности при проведении подготовительной выработки:
 1 – скважины барьерной дегазации;
 2 – регулируемый гидроотжим;
 3 – поперечный гидроразрыв;
 4 – продольный гидроразрыв;
 5 – скважина (шпур) для выполнения гидроразрыва;
 6 – датчик метана

Fig. 7
Diagram of the application of measures to reduce gas and gas-dynamic hazard while driving the development working:
 1 – barrier degassing boreholes;
 2 – adjustable hydro-pressing;
 3 – a transverse hydrofrac;
 4 – a longitudinal hydrofrac;
 5 – a hydrofrac borehole;
 6 – a methane sensor

скважин ($l_{скв}$); угол наклона скважины (α); места заложения щелей гидроразрыва (l_p); неснижаемое опережение ($l_{но}$). Бурение скважин 1 и 3, указанных на рис. 6, выполняется из забоя выработки под углом от 15 до 75 град к ее оси в плоскости пласта. В скважинах 1 гидроразрыв производится в зонах дезинтеграции, что позволяет использовать упругую энергию массива. Замки анкеров 5 располагаются за зоной дезинтеграции с целью предотвращения их смещения к борту выработки. В скважине 2 проводится серия гидроразрывов впереди забоя на глубине $\tau_{n+1} \geq l_{но}$.

Повышения дегазационного эффекта можно достичь применением получивших в последнее время распространение методов высоконапорного увлажнения с элементами гидроразрыва [15; 16]. Технология гидроразрыва угольных пластов заключается в повышении продуктив-

ности дегазационных скважин с помощью создания перпендикулярных или продольных трещин через скважины в угольном пласте (рис. 7). Расстояние между скважинами и количество гидроразрывов, проводимых в каждой скважине, зависит от физико-механических свойств угольного пласта и от поставленных производственной необходимостью задач по обеспечению безопасных условий ведения горных работ по газовому фактору. В целях безопасности гидроразрыв, как правило, выполняется на удалении от приконтурной части пласта. С целью повышения газопроницаемости пласта в документе [17] предложены схемы проведения регулируемого гидроотжима (с элементом гидроразрыва) в приконтурной части пласта проводимой подготовительной выработки. Основы методики оценки состояния угольного пласта в призабойной его части на основании газокинетической реакции угольного пласта с использованием данных о метанообильности выработки представлены в работе [18].

Заключение

Разработан комплексный метод по совершенствованию управления газовыделением при ведении горных работ, включающий метод определения газокинетических свойств и газодинамической активности угольного пласта, методы прогноза и контроля метанообильности подготовительных выработок, очистных забоев и выемочных участков.

Проводимые исследования перспективны и практически значимы – они учитывают как специфику горно-геологических и горнотехнологических характеристик месторождения в целом, так и конкретного выемочного участка или подготовительной выработки в условиях изменчивости свойств и состояний массива при высоких темпах ведения горных работ.

По результатам проведенных лабораторных и шахтных экспериментов, численного моделирования изучаемых газо-геомеханических процессов в массиве горных пород при отработке пологих угольных пластов длинными столбами разработаны подходы и методы, которые ложатся в основу создания единой адаптивной автоматизированной системы прогноза и контроля газопроявлений в угольных шахтах, от стадии планирования горных работ до разработки рекомендаций по повышению эффективности и безопасности процесса угледобычи.

Список литературы

1. Полевщиков Г.Я., Рябцев А.А., Непейна Е.С., Цуран Е.М., Титов В.П., Ванин Е.А., Мельгунов М.С., Назарова Л.А., Назаров Л.А. *Способ определения газокинетических характеристик угольного пласта*. Патент РФ №2526962 С1, 27.08.2014. 2014. Бюл. №24.
2. Плаксин М.С., Родин Р.И., Радиковский И.В., Шинкевич А.В. Результаты измерения газового потенциала в приконтурной части угольного пласта. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021;(4):50–57. <https://doi.org/10.25558/VOSTNIL.2021.32.69.005>
3. Robin V.A., Kozyreva E.N. Desorption and resorption of methane by coal in a sealed volume. *Coke and Chemistry*. 2023;66(2):70–74. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700527>
4. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Кормин А.Н., Уткаев Е.А. Определение газоносности угольных пластов на основе исследования процессов фильтрации и диффузии метана. *Уголь*. 2015;(1):74–77.
5. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion. *International Journal of Coal Geology*. 2015;137:142–151. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.10.016>
6. Gang W., Wenrui W., Pengfei W., Xinxiang Y., Shutong Z. Deformation and gas flow characteristics of coal-like materials under

- triaxial stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;91:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2016.11.015>
7. Плаксин М.С., Альков В.И., Родин Р.И., Рябцев А.А., Козырева Е.Н., Худынцев Е.А. Устройство для определения газоносности угольного пласта. Патент №2021100534 С1 РФ, Е21F 7/00, 23.03.2022. 2021. Бюл.№9.
 8. Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю.А. Акустический шум угольного пласта как показатель геодинамического состояния очистного забоя. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(1):23–30. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220103>
 9. Опарин В.Н., Потапов В.П., Киряева Т.А., Юшкин В.Ф. К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(8):5–39. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39>
 10. Козырева Е.Н., Леонтьева Е.В., Буланчиков С.П., Ослаповский С.Ф. Определение параметров скважин дегазации с учетом структуризации вмещающего массива (на примере лавы №560 шахты «Чертинская – Коксовая»). *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016;(4):22–28.
 11. Gu S., Zhang W., Jiang B., Hu C. Case of rock burst danger and its prediction and prevention in tunneling and mining period at an irregular coal face. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019;37(4):2545–2564. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00776-y>
 12. Huang W., Wang H., Zhang T., Yan L., He M. Hydraulic pressure effect on mechanical properties and permeabilities of layered rock mass: an experimental study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020;27(6):2422–2433. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1763844>
 13. Шадрин А.В., Клишин В.И. Совершенствование методов автоматизированного прогноза опасности проявления динамических явлений в процессе разупрочнения кровли и профилактической гидрообработки угольных пластов. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2017;(3):31–35.
 14. Клишин В.И., Тайлаков О.В., Опрук Г.Ю., Уткаев Е.А., Клишин С.В. Методы гидроразрыва труднообрушающейся кровли и угольного пласта для исключения динамических явлений в угольных шахтах. *Горная промышленность*. 2022;(6):46–53. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-46-53>
 15. Мазаник Е.В., Понизов А.В., Садов А.П., Сластунов С.В. Усовершенствованная технология предварительной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва. *Знание*. 2016;(5-1):111–116.
 16. Клишин В.Н., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б., Дурнин К.М. Разупрочнение угольного пласта, в качестве метода интенсификации выделения метана. *Уголь*. 2010;(4):40–42.
 17. Полевщиков Г.Я., Розанцев Е.С., Лохов В.И., Крючков И. *Руководство по применению безопасного и контролируемого способа интенсивной дегазации призабойной части пласта для предотвращения внезапных выбросов угля и газа с использованием эффекта гидроотжима и аппаратуры контроля метана (регулируемый гидроотжим)*. Кемерово: ВостНИИ; 1987. 16 с.
 18. Плаксин М.С. Развитие метода автоматизированного контроля газодинамической активности призабойной зоны угольного пласта при проведении подготовительных выработок. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2014;(2):23–28.

References

1. Polevshchikov G.Ya., Ryabtsev A.A., Nepeina E.S., Tsuran E.M., Titov V.P., Vanin E.A., Melgunov M.S., Nazarova L.A., Nazarov L.A. *Method of determining the gas kinetic characteristics of a coal seam*. RF Patent No.2526962 C1, 27.08.2014. 2014. Bul. №24. (In Russ.)
2. Plaksin M.S., Rodin R.I., Radikovskiy I.V., Shinkevich A.V. Results of measurement of gas potential in the contour part of coal seam. *Bulletin of Scientific Centre VostNIИ for Industrial and Environmental Safety*. 2021;(4):50–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.32.69.005>
3. Bobin V.A., Kozyreva E.N. Desorption and resorption of methane by coal in a sealed volume. *Coke and Chemistry*. 2023;66(2):70–74. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700527>
4. Taylakov O.V., Zastrellov D.N., Kormin A.N., Utkaeв E.A. Determination of gas-bearing capacity of coal banks based on the study of methane filtration and diffusion processes. *Ugol'*. 2015;(1):74–77. (In Russ.)
5. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion. *International Journal of Coal Geology*. 2015;137:142–151. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.10.016>
6. Gang W., Wenrui W., Pengfei W., Xinxiang Y., Shutong Z. Deformation and gas flow characteristics of coal-like materials under triaxial stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;91:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2016.11.015>
7. Plaksin M.S., Alkov V.I., Rodin R.I., Ryabtsev A.A., Kozyreva E.N., Khudyntsev E.A. *Device for determining the gas content of a coal seam*. Patent No. 2021100534 S1 the Russian Federation, E21F 7/00, 23.03.2022. 2021. Bul. №9. (In Russ.)
8. Reuter M., Krach M., Kießling U., Veksler J. Correlations between mechanical and index properties of sandstone from the central salt range. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2022;(1):23–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220103>
9. Oparin V.N., Potapov V.P., Kiryaeva T.A., Yushkin V.F. Development of methods and means for integrated geo-information-based analysis of influence exerted by nonlinear deformation and wave processes induced by seismic forces on geomechanical behavior of pit walls and on gas-dynamic activity in coal mines in Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(8):5–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39>
10. Kozyreva E.N., Leontieva E.V., Bulanchikov S.P., Oslapovsky S.F. Defining the degassing boreholes parameters with the account of the surrounding rock structuring (with the example of No. 560 longwall of mine Chertinskaia-Koksovaia). *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2016;(4):22–28. (In Russ.)

11. Gu S., Zhang W., Jiang B., Hu C. Case of rock burst danger and its prediction and prevention in tunneling and mining period at an irregular coal face. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019;37(4):2545–2564. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00776-y>
12. Huang W., Wang H., Zhang T., Yan L., He M. Hydraulic pressure effect on mechanical properties and permeabilities of layered rock mass: an experimental study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020;27(6):2422–2433. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1763844>
13. Shadrin A.V., Klishin V.I. The improvement of automated dynamic phenomena forecast methods during roof weakening and preventive hydrotreating. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2017;(3):31–35. (In Russ.)
14. Klishin V.I., Tailakov O.V., Opruk G.Yu., Utkaev E.A., Klishin S.V. Methods of hydraulic fracturing of poorly caving roof and coal seams to eliminate dynamic phenomena in coal mines. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):46–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-46-53>
15. Mazanik E.V., Ponizov A.V., Sadov A.P., Slastunov S.V. The advanced technology of preliminary degassing of coal seams based on their fracturing operations. *Znanie*. 2016;(5-1):111–116. (In Russ.)
16. Klishin V.N., Kokoulin D.I., Kubanychbek B., Durnin K.M. Re-hardening of a coal layer as a method of an intensification of allocation of methane. *Ugol'*. 2010;(4):40–42. (In Russ.)
17. Polevshchikov G.Ya., Rozantsev E.S., Lokhov V.I., Kryuchkov I. *Guidelines for the use of a safe and controlled method for intensive degassing of the bottomhole part of the formation to prevent sudden emissions of coal and gas using the hydraulic squeeze effect and methane control equipment (controlled hydraulic squeeze)*. Kemerovo: VostNII; 1987. 16 p. (In Russ.)
18. Plaksin M.S. Development of the automated control of gas-dynamic activity of the coal seam pre-face area at preparation galleries heading. *Vestnik of Safety in Coal Mining Scientific Center*. 2014;(2):23–28. (In Russ.)

Информация об авторах

Козырева Елена Николаевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: Kozyrevaen@ic.sbras.ru

Плаксин Максим Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: plaksin@bk.ru

Шинкевич Максим Валериевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

Родин Роман Иванович – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: rodinri@mail.ru

Рябцев Андрей Александрович – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.07.2023

Поступила после рецензирования: 23.08.2023

Принята к публикации: 24.08.2023

Information about the authors

Elena N. Kozyreva – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: Kozyrevaen@ic.sbras.ru

Maksim S. Plaksin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: plaksin@bk.ru

Maksim V. Shinkevich – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Kemerovo, Russian Federation

Roman I. Rodin – Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: rodinri@mail.ru

Andrey A. Ryabtsev – Researcher Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Kemerovo, Russian Federation

Article info

Received: 30.07.2023

Revised: 23.08.2023

Accepted: 24.08.2023