УДК 622.86:622.411.3

Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий

А.К.ДЖИГОЕВА¹, В.С.БРИГИДА²✉¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия² Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия

Как цитировать эту статью: Джигоева А.К. Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий / А.К.Джигоева, В.С.Бригида // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 522-530. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3

Аннотация: Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности утилизации шахтного метана для обеспечения устойчивого развития геотехнологий в рамках перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. Ее актуальность обусловлена тем, что антропогенное влияние эмиссии шахтного метана на глобальные процессы изменения климата в 21 раз превышает действие диоксида углерода. Свиты газоносных угольных пластов и вмещающих пород следует относить к техногенным углегазовым месторождениям, а извлекаемый из них газ – к альтернативным энергоресурсам. Существующие подходы и методы борьбы с шахтным метаном нуждаются в совершенствовании, поскольку в современной концепции «шахта – лава» не полностью учитываются пространственно-временные особенности развития очистных работ. Поэтому вопросы, связанные с ним, являются актуальными для большинства областей знаний, а особенно для экологизации добычи угля.

Целью статьи является выявление закономерностей, описывающих нелинейный характер динамики метановыделения в подземных скважинах для обеспечения устойчивого развития геотехнологий, за счет повышения качества отводимой метановоздушной смеси.

Впервые при пространственно-временном исследовании (в плоскости CH_4-S) динамики концентрации метана, согласно планируемому подходу, вводят параметр удаления от лавы (L), что позволяет сформировать пространство функции исследуемого процесса (CH_4 от $S-L$). Результаты шахтных замеров обрабатывались методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS).

Исследование основано на использовании нелинейности изменений концентрации метана в подземных скважинах и особенностей их реализации для осуществления вакуумирования в максимально продуктивных зонах подрабатываемого массива с целью обеспечения безопасного аэрогазового режима выемочного участка при интенсивной отработке глубокозалегающих газоносных пластов. Установление закономерностей влияния ситуационных геомеханических условий отработки запасов на инициирование трансформации метастабильного газоугольного раствора и генезис волновых процессов в углепородном массиве позволит повысить надежность прогнозирования динамики метановыделения, а также управляемость технологическими процессами горного производства. В приведенных результатах показано, что отработка высокометаносных пластов Донбасса сопряжена с недостаточной надежностью работы дегазационной сети в более чем 40 м позади забоя лавы.

Полученные результаты подтверждают рабочую гипотезу о наличии пространственной миграции волн концентрации метана в подземных дегазационных скважинах. Необходимо продолжить исследования в области определения углов отклонений границы зоны «опережающей трещиноватости» от направления линии очистного забоя. Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их использования при разработке научных основ трехмерной дегазации техногенного углеметанового коллектора с учетом пространственно-временного развития очистных работ.

Ключевые слова: метан угольных пластов; метановый коллектор; рудничный газ; угольное месторождение; эффективность дегазации; устойчивые геотехнологии; лава

Введение. Вопросы, связанные с проблемой шахтного метана, для нашей страны являются особенно актуальными в связи с необходимостью «перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике и повышения эффективности добычи...», который является одним из приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития РФ. В то же время это согласуется с одной из прогрессивных общемировых тенденций – использованием элементов концепции «зеленой» экономики в развитии подземных геотехнологий для перехода к «sustainable mining» [2, 21, 36]. К обязательным элементам устойчивого развития (в области экологизации горного производства) стоит отнести: комплексное освоение недр в рамках программы «Индустрия 4.0», обеспечение продуктивной окружающей среды, а также мероприятия, направленные на энергосбережение в горном производстве [4, 28, 38].

Экологическая ориентация горного производства сдерживается отсутствием концептуального видения метана не только как парникового газа, но и внутреннего источника роста рентабельности угледобычи. Использование метана в газопоршневых установках для выработки электроэнергии и тепла позволяет повысить энергоэффективность горного производства при существенном снижении себестоимости добычи угля. Эксплуатация участковой дегазационной сети с концентрацией газа в смеси менее 25 % запрещено по действующим правилам безопасности, при этом нарушение герметичности даже одной скважины (особенно в районе устья) приводит к образованию аэродинамической связи с атмосферой горной выработки. Это является существенной угрозой для безопасного ведения горных работ и обеспечения экологически сбалансированного природопользования.

Свиты газоносных угольных пластов и вмещающих пород следует относить к техногенным углегазовым месторождениям, а извлекаемый из них газ – к альтернативным энергоресурсам (нетрадиционным видам углеводородного сырья). Их интенсивная отработка обуславливает сложности описания взаимосвязей нелинейных геомеханических и газодинамических процессов в массиве горных пород. Этим обуславливается обострение проблем обеспечения необходимого качества отводимой газовоздушной смеси для целей когенерации. Основными сдерживающими факторами для ее эффективного вовлечения в процесс энергогенерации остаются проблемы в области: обеспечения устойчивости скважин [15], повышения эффективности их бурения [11], несовершенства режимов работы очистного комбайна [25], но существенной эмиссией метана на поверхность из техногенных разломов и закрытых шахт [16]. Для их преодоления в настоящее время совершенствуются как давно апробированные методы (гидроразрыв пласта) [7], так и принципиально новые направления (биотехнологии) дегазации углепородного массива [14]. В то же время теоретические основы и механизмы взаимосвязей аэрогазовых и геомеханических процессов при интенсификации очистных работ остаются не изученными до конца.

В свою очередь нелинейный характер горного давления реализуется в виде разного рода деформаций контура скважин и может приводить к выходу их из строя [26, 43]. Для объяснения природы деформационно-волновых процессов при интенсивной отработке газоносных пластов (подразумевая эквивалентность давления в стойках механизированной крепи параметрам сдвижения пород кровли) в основном используют концепцию движущегося свода В.Д.Слесарева (Г.Я.Полевщиков [19]) или волн маятникового типа (В.Н.Опарин [10]). На данных предположениях основываются объяснения частных вопросов нелинейной динамики применительно к моделированию аэрогазового режима дегазационных скважин.

Для максимально продуктивной дегазации (особенно пространственной) источников метановыделения необходимо представить во времени модели развития областей повышенного трещинообразования в плоскости лавы и подготовительных выработок [8]. Из работ [40-41] известен механизм дренирования метана в области влияния подготовительной выработки. Он представляется в виде модели образования разгрузки от напряжений в кольцеобразных зонах (зонах разрушенных пород, пластичной, упругой и зоне естественного напряженного состояния в массиве горных пород) вокруг выработки и скважины [27]. В этих зонах происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния массива, приводящее к увеличению трещиноватости и проницаемости газоносных пород. Представленная концепция достаточно упрощенно описывает развитие процессов зональной дезинтеграции (Е.И.Шемякин, М.В.Курленя, В.Н.Опарин), а именно: «в массиве горных пород... вокруг горных выработок образуются кольцеобразные чередующиеся зоны слабо нарушенных и разрушенных пород» [6].

Вдоль протяженности вентиляционной выработки, на различном удалении от линии очистного забоя, в соответствии различной степенью техногенной нарушенности, области массива разделяют на следующие зоны: максимальной и переходной проницаемости, барьера и стабилизации [39]. Учет взаимодействия геомеханических факторов в виде объемных моделей смещения породной толщи позволяет прогнозировать распределение метановыделения в пространстве вмещающего углепородного массива. При этом его нелинейная составляющая отражается лишь частично.

Рис. 1. Результаты моделирования распределения проницаемости и концентрации метана в подрабатываемом угленосном массиве [39]: а – распределение концентрации метана вдоль выемочного столба (вид сверху); б – в сечении лавы; в – изменения горизонтальной проницаемости в плоскости лавы и 60 м позади лавы (выработанное пространство); г – распределение изменений вертикальной проницаемости в 60 м позади лавы (выработанное пространство)

Наиболее представительными зарубежными исследованиями в рассматриваемом вопросе являются работы H.Guo, L.Yuan, B.Shen и др., которые для моделирования геомеханических и аэрогазовых процессов использовали экспериментально-аналитический метод (рис. 1).

В результате было выявлено, что опорное давление может распространяться на расстоянии до 300 м впереди очистного забоя. Активизация сдвижений вышележащего массива активизирует расслоение и трещинообразование в пределах 170 м позади лавы, а высота техногенного коллектора газа может достигать до 145 м по высоте кровли пласта. В этой зоне уровень напряжений гораздо ниже, чем в опорной зоне (наличие разгрузки), что приводит к интенсификации метановыделения. В работе [32] разработана модель течения метановоздушной смеси с учетом деформационных процессов, протекающих в массиве, вмещающем дегазационную скважину. Она позволяет учитывать влияние различных факторов (газовой сорбции, пористости угля, глубины герметизации и значений подсосов воздуха) на концентрацию метана в извлекаемой смеси.

Большинство зарубежных и отечественных исследований отражают результаты натурных исследований динамики метановыделения в зависимости от времени проведения замеров [18], расстояния до забоя лавы [44] вдоль протяженности выемочного столба [5, 35] или их комбинации [29]. К основному недостатку большинства моделей можно отнести недостаточный учет фактора времени, а также изменения ситуационных геомеханических условий отработки запасов. Это не позволяет выявить нелинейную составляющую деформационных процессов и, как следствие, снижает качество моделей динамики метановыделения.

Из наиболее значимых исследований отечественных ученых в данной области являются работы [3, 9, 17, 42]. Исследования [17] были направлены на разработку теории энергетического потенциала угольного метана и раскрытие особенностей его реализации в массиве горных пород. В результате была установлена взаимосвязь между динамикой метановыделения и нелинейностью проявлений упругих волн маятникового типа в угленосном массиве. Данное направление нуждается в развитии и верификации теоретико-экспериментальных моделей, с достаточной достоверностью описывающих нелинейность динамики, а также ее отличия от флуктуационной и наведенной составляющей (вызванной подвиганием очистного забоя).

В связи с этим исследование базируется на гипотезе, что «нелинейные проявления напряженно-деформируемого состояния вмещающего массива (вызванные пространственно-временным раз-

втием очистных работ) индуцируют трансформацию метастабильного газоугольного раствора и обуславливают генезис волн концентрации метана, которые могут перемещаться в зависимости от удаления забоя лавы и роста протяженности пролета основной кровли».

Таким образом, раскрытие особенностей пространственного расположения волн концентрации метана в подземных скважинах является фундаментальной научной задачей для обеспечения устойчивого развития подземных технологий отработки газоносных угольных пластов на больших глубинах. В связи с этим объектом исследования являются особенности нелинейного аэрогазового режима дегазационных скважин, обусловленные волнами разгрузки и сдвижением пород кровли.

Недостаточная надежность работы участков дегазационной сети может привести к невозможности использования шахтного метана в качестве топлива для газопоршневых установок когенерационных станций. Это актуализирует необходимость разработки комплексной программы в области достижения экологической трансформации и повышения энергоэффективности горного производства. Поэтому целью работы является выявление закономерностей, описывающих нелинейный характер динамики метановыделения в подземных скважинах, для обеспечения устойчивого развития геотехнологий.

Материалы и методы. Большинство исследователей [5, 22, 34] выявлены закономерности и установлены полуэмпирические зависимости динамики метановыделения или параметров пространственного расположения скважин (расстояния до пикетов S или линии очистного забоя L). В свою очередь, совокупность полученных ими результатов не позволяет достаточно полно описать общий механизм протекания исследуемого процесса. Неточности в общей постановке задачи и ограниченность подхода к ее решению выражаются в невозможности представить четырехмерное пространство (с учетом времени) на плоскости, что существенно сужает спектр решения подобных задач.

Решения задач о пространственном распределении исследуемого параметра (коэффициента концентрации эквивалентных напряжений в массиве, скорости ветра или частотно-направленного спектра волн) под действием внутренних и внешних факторов частично решаются в смежных областях знаний. Так для обеспечения устойчивости горных выработок успешно используют трехмерное моделирование для контуров различной формы с использованием метода конечных элементов (реализованный в различных пакетах прикладных программ) [30-31]. Недостатки данного подхода подобны указанным для работы [32] (описание процесса в статике, учет главным образом горизонтальной проницаемости вышележащего массива, не принимается в расчет нелинейный характер протекания геомеханических процессов и их влияние на проницаемость, двумерная обработка натурных измерений смещений породных слоев кровли, непостоянство метановыделения во времени).

В гидрометеорологии [12-13] на основании данных реанализа NCEP/NCAR Reanalysis1 осуществляется спектральное гидродинамическое моделирование (на основе модели Simulating Waves Nearshore Model) параметров ветрового волнения. В то же время сравнение с натурными замерами (по реперным метеорологическим станциям) осуществляют при помощи регрессионного анализа (в двумерной постановке), что существенно ограничивает применимость полученных результатов. Более рационально для аппроксимации исследуемых пространственно-временных переменных использовать ряды Фурье, по примеру решения вопросов оптимизации обогащения руд [23].

Результаты замеров обрабатывались методом локальной полиномиальной регрессии LOESS по методике работы [20] – для определения аппроксимирующей функции при наличии большого разброса данных (scattered data). Уточнение неполной выборки проводили методами трехмерной интерполяции (Akima, Preusser, Renka, Watson). Процедуры оптимизации выбирали по коэффициенту детерминации таким образом, чтобы проекция оптимизированной поверхности максимально точно совпадала с исходными данными. Наиболее удовлетворительные результаты дало использование алгоритма Watson, в котором для интерполяции используется процедура круглой ареальной основы, и Renka – стандартной триангуляционной процедурой Р.Ренки.

Из исследования [1] известно о волновых изменениях концентрации метана в дегазируемом массиве горных пород при отработке пласта m_3 с метанообильностью до 23 м³/т с.б.м. При лав-

ной технологии добычи угля, до начала отработки панели барьерные скважины (cross-measure boreholes) были пробурены навстречу очистному забою через каждые 25 м (одновременно эксплуатировалось 6-8 скважин). В исследовании установлено наличие нелинейного характера изменений концентрации метана при дегазации массива скважинами с одинаковой пространственной ориентацией. Данный факт был зарегистрирован как позади лавы, так и в более 45 м перед линией очистного забоя. Недостатком работы являлось отсутствие методики представления пространственного распределения газовых потоков в трехмерном виде. В связи с этим массив экспериментальных [1] использовались для обработки и получения поверхностей изогаз (в трехмерной постановке задачи), отражающих динамику концентрации метана от расстояния до линии очистного забоя и положения устьев скважин по отношению к началу выемочного участка. Замеры осуществлялись у устья каждой скважины по стандартной методике производства замеров при помощи газоанализаторов Dräger X-AM 2500 с каталитическим сенсором CatEx 125 PR Mining. Для повышения достоверности проведения экспериментальных исследований, периодические данные Dräger X-AM 2500 проверялись прибором ШИ-12 (расхождения в среднем не превышали 10 %).

Впервые при пространственно-временных исследованиях (в плоскости CH_4 - S) динамики концентрации метана, согласно планируемому подходу, вводили параметр удаления от лавы L , что позволило сформировать пространство функции исследуемого процесса (CH_4 как функцию от S - L).

Результаты и обсуждения. В результате обработки экспериментальных данных установлена зависимость изменения концентрации метана в подземных скважинах от параметров фронта развития очистных работ, имеющая полиномиальный вид ряда двумерных ($X = S$, $Y = L$) многочленов (П.Л.Чебышева) первого рода (7-го порядка).

Многочлены Чебышева (тригонометрический вид):

$$T_n(S') = \cos(n \arccos(S')); \quad (1)$$

$$T_n(L') = \cos(n \arccos(L')). \quad (2)$$

Область определения точек (интервал ортогональности аппроксимирующих многочленов П.Л.Чебышева): $S' = S$ для всех $S \in [-1, 1]$ и $L' = L$ для всех $L \in [-1, 1]$.

Итоговая (приближенная с $R^2 = 0,967$) функция концентрации метана от удаления от забоя лавы при увеличении пролета основной кровли имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4 = & 26,6 - 6,9T_1(S') + 30,5T_1(L') - 11,1T_2(S') - 14,8T_1(S')T_1(L') + 6,2T_2(L') - \\ & - 8,6T_3(S') - 16,5T_2(S')T_1(L') + 5,0T_1(S')T_2(L') - 2,5T_3(L') - \\ & - 0,4T_4(S') - 15,8T_3(S')T_1(L') - 12,9T_2(S')T_2(L') + 7,4T_1(S')T_3(L') - \\ & - 4,1T_4(L') + 3,8T_5(S') + 1,9T_4(S')T_1(L') - 11,5T_3(S')T_2(L') - \\ & - 1,4T_2(S')T_3(L') + 13,4T_1(S')T_4(L') - 0,9T_5(L') + 0,5T_6(S') + \\ & + 6,0T_5(S')T_1(L') + 0,6T_4(S')T_2(L') - 3,4T_3(S')T_3(L') + 6,4T_2(S')T_4(L') + \\ & + 3,7T_1(S') + T_5(L') + 2,2T_6(L') - 1,1T_7(S') + 2,1T_6(S')T_1(L') + \\ & + 4,6T_5(S')T_2(L') - 2,8T_4(S')T_3(L') - 0,6T_3(S')T_4(L') + \\ & + 2,4T_2(S')T_5(L') - 9,8T_1(S')T_6(L') + 1,8T_7(L'), \end{aligned} \quad (3)$$

где CH_4 – концентрация метана, %; L – расстояние от устья скважины до очистного забоя, м; S – расстояние от начала выемочного участка до очистного забоя, м.

При рассмотрении поверхности 1 в плоскости CH_4 - L можно установить зональности расположения области локальных максимумов метановыделения (рис.2).

Наглядно показаны перемещения областей с циклическим изменением динамики концентрации метана (рис.2). Пунктиром обозначена линия нулевого расстояния до забоя, отрицательные значения L – расстояние впереди лавы, положительные – в выработанном пространстве. Из анализа формы поверхности видно, что работа скважин, большую часть времени находящихся впереди лавы (более 10 м), характеризуется недостаточной надежностью (менее 25 %). Кроме того, значение и расположение локальных максимумов и минимумов также нелинейно меняют свое положение по всей плоскости S - L .

Как указывалось в работе [1], по-видимому, «на этот процесс наибольшее влияние оказывают величина пролета кровли и расстояние до лавы» (рис.3). Причем вплоть до расстояния примерно в 1335 м от начала участка (пролет кровли 25 м) область локальных максимумов метановыделения A , находящаяся на удалении 30 м от лавы, начала смещаться ближе к лаве, постепенно сменяясь зонами локальных минимумов.

Из рис.3 следует, что особенности пространственно-временного распределения концентрации метана обусловлены увеличением предельного пролета основной кровли. На исследуемой поверхности обнаружены три области локальных максимумов (когда устья скважин находились впереди линии очистного забоя) – точки A , B и C . Экстремумы поверхности функции в этих областях проявляются на следующих расстояниях до лавы: A (32 %) – в –41; B (23 %) – в –79 и C (17 %) – в –116 м.

Первая область с работоспособным состоянием скважин и экстремумом в точке A прослеживалась на расстоянии 32–41 м до лавы, находящейся на пикете 1349 м, что соответствовало пролету основной кровли в 11 м. При сравнимом пролете, но уже в 118 м впереди лавы (точка C) уровень концентрации метана еще остается опасно низким. Область локального максимума метановыделения с экстремумом в точке B пикета примерно 1294 м тоже соответствует параметрам отказа скважин. Следует отметить рост площади распространения данной зоны, что можно объяснить ростом величины пролета кровли и увеличением зависания породных консолей с образованием расслоений по межслоевым контактам пород, в 67–72 м позади лавы.

Рис.2. Аксонометрическая проекция пространственного распределения динамики метановыделения в осях (S - L): подписи осей соответствуют формуле (3); A , B , C – точки локальных максимумов метановыделения впереди лавы

Рис.3. Проекция пространственного распределения динамики метановыделения в подземных дегазационных скважинах на ось CH_4 - L

Рис.4. Проекция пространственного распределения динамики метановыделения в подземных дегазационных скважинах на ось (S-L)

Проекция полученной поверхности на ось $S-L$ (величина протяженности вентиляционного штрека пикетов 18-й восточной лавы – расстояния до забоя лавы) представлено на рис.4. Изолиниями (изогазами) показано геометрическое место точек с одинаковыми значениями концентрации метана.

Общая картина динамики метановыделения, представленная на рис.4, наглядно подтверждает теоретические представления и гипотезу о нелинейности проявлений опорного давления, обусловленной проявлениями зональной дезинтеграции. Интересно, что фронт зоны опережающей трещиноватости (Ф.А.Абрамов, А.Лабасс, М.М.Андреев) не параллелен линии очистного забоя, а проходит под некоторым (пологим) углом по отношению к ней. Это явление нуждается в уточнении и проверке, что актуализирует необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

Выявленные особенности динамики метановыделения могут объяснить результаты обследования стенок подрабатываемых скважин на шахте Zhuji (Китай) [43], а также динамики метановыделения на шахте Котинская (Кузбасс) [42]. Китайскими исследователями было установлено, что современные средства обсадки устьев и стволов скважин не позволяют компенсировать проявления горного давления, что приводит к выходу их из строя. Одним из перспективных направлений в данной области может быть использование разгрузочного бурения в сочетании с методами физико-химического анкерования [24].

Заключение. Исходя из результатов исследования, подтверждается гипотеза о характере миграции волн метановыделения. Отсюда можно сделать следующие выводы:

- установлено, что рост пролета основной кровли с 17 до 80 м, а также уменьшение расстояния до линии очистного забоя (впереди лавы) с 110 до 30 м вызывает нелинейный характер увеличения концентрации метана в подземных скважинах по полиномиальной зависимости с 13 до 33 %;
- увеличение пролета пород кровли с 10 до 70 м обуславливает увеличение области локального максимума метановыделения в 70-90 м впереди линии очистного забоя, при этом аэрогазовый режим дегазационной системы нуждается в более качественном управлении;
- отработка глубокозалегающих газоносных угольных пластов существующими геотехнологиями, а также мероприятия по оперативному управлению работой участковой дегазационной сети не позволяют обеспечить безопасный уровень ($\leq 25\%$) концентрации метана в отводимой смеси до приближения забоя лавы ≤ 20 м.

Предложенный подход к представлению данных в трехмерном виде может быть использован для более точного описания пространственного распределения газоносности в свите угольных пластов (в качестве дополнения к использованию ГИС [33]) или особенностей распределения углеводородного потенциала в тектонических экранных ловушках [37].

В связи с этим для совершенствования технологий обеспечения надежности дегазационных систем и повышения качества отводимой метановоздушной смеси особенно актуально использование выявленных особенностей и количественных закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бригида В.С. Особенности метановыделения из дегазационных скважин впереди очистного забоя / В.С.Бригида, Н.Н.Зинченко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 69-74.
2. Грязев М.В. Обоснование динамического метода расчета количества воздуха для проветривания очистного забоя и предельно допустимая производительность очистного участка по газовому фактору / М.В.Грязев, Н.М.Качурин, Г.В.Стасть // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 2. С. 296-305.
3. Грязев М.В. Математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов при подземной добыче угля на различных стадиях отработки месторождений / М.В.Грязев, Н.М.Качурин, С.А.Воробьев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 99-108. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99

4. Голик В.И. Основа устойчивого развития РСО-Алания – горнодобывающая отрасль / В.И.Голик, Ю.И.Разоренов, К.Г.Каргин // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 2 (32). С. 163-171. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-2-163-171
5. Динамика метановыделения в очистной забой при отработке мощных пологих угольных пластов с выпуском подкровельной пачки / Н.М.Качурин, А.Ю.Ермаков, Д.Н.Шкурятский, А.Н.Качурин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 170-179.
6. Диплом на открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е.И.Шемякин, М.В.Курленя, В.Н.Опарин, В.Н.Рева, Ф.П.Глушихин, М.А.Розенбаум. Заявлено ОТ-11253 от 12.12.85. Приоритет 09.02.78 и 29.10.85 // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1992. № 1. С. 3.
7. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва / М.В.Курленя, С.В.Сердюков, А.В.Патутин, Т.В.Шилова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 6. С. 3-9. DOI: 10.15372/FTPRP20170601
8. Казанин О.И. О проектировании подземной отработки свит пологих газоносных угольных пластов // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 38-45.
9. Казанин О.И. Оценка влияния длины лавы на характер газовыделения на выемочных участках шахт ОАО «Воркутауголь» / О.И.Казанин, А.М.Суфияров // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 36-40.
10. 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 / В.Н.Опарин, В.П.Потапов, Т.А.Киряева, В.Ф.Юшкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 8. С. 5-39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39
11. Литвиненко В.С. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями / В.С.Литвиненко, М.В.Двойников // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 105-112. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105
12. Лопатухин Л.И. Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов / Л.И.Лопатухин, Н.А.Яицкая // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 12-21. DOI: 10.31857/S 0030-15745912-21
13. Матишов Д.Г. Изменения температуры и солености вод Каспийского моря в XX веке / Д.Г.Матишов, Н.А.Яицкая, С.В.Бердников // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 864-874. DOI: 10.1134/S0030157418060114
14. Научно-технические вопросы разработки биотехнологий дегазации угольных месторождений / М.В.Курленя, Е.К.Мельянова, И.С.Андреева, А.В.Савченко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 6. С. 79-88. DOI: 10.15372/FTPRP20190608
15. Обеспечение устойчивости подрабатываемых наклонных дегазационных скважин при интенсивной разработке свит газоносных угольных пластов / В.С.Бригида, В.И.Голик, Ю.В.Дмитрак, О.З.Габараев // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 497-501. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.497
16. Обоснование параметров технологии интенсивной отработки пологих угольных пластов в условиях вредного воздействия горных работ на дневную поверхность / О.И.Казанин, М.Г.Мустафин, А.А.Мешков, А.А.Сидоренко // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2015. № 2. С. 51-56.
17. Основные научные положения прогноза динамики метановыделения при отработке газоносных угольных пластов / В.И.Бондаренко, Е.Н.Харин, Н.И.Антощенко, Р.Л.Гасюк // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2013. № 5. С. 24-30.
18. Опарин В.Н. К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 3-21.
19. Полевщиков Г.Я. «Деформационно-волновые» процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 50-61.
20. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход / В.С.Бригида, Х.Х.Кожиев, А.А.Сарян, А.К.Джигоева // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 4. С. 20-32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32
21. Рыльникова М.В. Гармоничное развитие горной промышленности, науки и высшего горного образования – гарантия устойчивого состояния горнопромышленных регионов России // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 1 (43). С. 154-161. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-154-161
22. Сластунов С.В. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля / С.В.Сластунов, С.В.Ютяев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 125-130. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125
23. Снижение размерности пространственно-временных моделей нелинейных динамических процессов обогащения железорудного сырья / В.С.Моркун, Н.В.Моркун, В.В.Тронь, С.Н.Грищенко, А.И.Суворов, Д.И.Паранюк, А.Ю.Сердюк // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 151-167. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2416
24. Учет влияния ситуационных геомеханических условий для совершенствования дегазации подрабатываемого массива горных пород / В.С.Бригида, В.И.Голик, Ю.В.Дмитрак, О.З.Габараев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 2. С. 279-288.
25. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы / М.В.Павленко, М.П.Хайдина, Д.А.Кузиев, Д.Пихторинский, А.З.Муратов // Уголь. 2019. № 4 (1117). С. 8-11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11
26. A new method of monitoring the stability of boreholes for methane drainage from coal seams / Y.Niu, X.Zhang, E.Wang, Z.Li, Z.Cheng, X.Duan, H.Li, Y.Wei, J.Qian, G.Cai, S.Lin, B.Li // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2020. № 154. 107521. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107521
27. A new pattern of underground space-time Tridimensional gas drainage: A case study in Yuwu coal mine, China / Y.Li, S.Wu, B.Nie, Y.Ma // Energy Science and Engineering. 2019. Vol 7. № 4. P. 399-410. DOI: 10.1002/ese3.282

28. About the equivalence of ore deposit development indicators / Z.M.Khasheva, L.P.Shulgaty, V.I.Golik, Yu.I.Razorenov, K.G.Karginov // International Business Management. 2016. Vol. 10. № 20. P. 4868-4872. DOI: 10.3923/ibm.2016.4868.4872
29. Application of directional boreholes for gas drainage of adjacent seams / F.An, Z.Wang, H.Yang, S.Yang, F.Pan, T.Chen, C.Xie // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2016. Vol. 90. P. 35-42. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.10.003
30. Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses – Case of underground coal mines / N.A.Do, D.Dias, V.D.Dinh, T.T.Tran, C.D.Dao, V.D.Dao, P.N.Nguyen // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. № 1. P. 99-110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.05.005
31. Do N.A. A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils 44 / N.A.Do, D.Dias // Environmental Earth Sciences. 2019. Vol. 76. № 3. P. 1-12. DOI: 10.1007/s12665-017-6425-z
32. Evaluation of the pre-drained coal seam gas quality / T.Xia, F.Zhou, J.Liu, F.Gao // Fuel. 2014. Vol. 130. P. 296-305. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.04.011
33. Evaluating of closed mines mining lease territories environmental safety by gas factor / N.M.Kachurin, V.I.Efimov, S.A.Vorobev, D.N.Shkuratskiy // Eurasian Mining. 2014. № 2. P. 41-44.
34. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: In situ direct method versus indirect method / X.Hou, S.Liu, Y.Zhu, Y.Yang // Fuel. 2020. Vol. 265. 116917. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116917
35. Evaluating pressure-relief mining performances based on surface gas venthole extraction data in longwall coal mines / C.Zhang, S.Tu, Q.Bai, G.Yang, L.Zhang // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P. 431-440. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.04.012
36. Griazev M.V. Energy-efficient technologies of integrated coal and mining waste development in the Moscow coal basin in the context of secure and sustainable supply of raw materials in Central Russia / M.V.Griazev, N.M.Kachurin, V.I.Spirin // Eurasian Mining. 2016. Vol. 2. P. 15-19. DOI: 10.17580/em.2016.02.04
37. Litvinenko V.S. Hydrocarbon potential of the Ural–African transcontinental oil and gas belt / V.S.Litvinenko, A.V.Kozlov, V.A.Stepanov // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2017. Vol. 7. № 1. P. 1-9. DOI: 10.1007/s13202-016-0248-4
38. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. № 3. P. 1521-1541 DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4
39. Mining-induced strata stress changes, fractures and gas flow dynamics in multi-seam longwall mining / H.Guo, L.Yuan, B.Shen, Q.Qu, J.Xue // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012. Vol. 54. P. 129-139. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.023
40. Pan Z. Modeling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data / Z.Pan, L.D.Connell // International Journal of Coal Geology. 2012. Vol. 92. P. 1-44. DOI: 10.1016/j.coal.2011.12.009
41. Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development / V.Bondarenko, M.Hardygora, H.Symanovych, V.Sotskov, V.Snihur // Mining of Mineral Deposits. 2016. Vol. 10. Iss 3. P. 1-12. DOI: 10.15407/mining10.03.001
42. Sidorenko A.A. Influence of face advance rate on geomechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines / A.A.Sidorenko, Yu.G.Sirenko, S.A.Sidorenko // Eurasian Mining. 2018. Vol. 1. P. 3-8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01
43. Strengthening Borehole Configuration from the Retaining Roadway for Greenhouse Gas Reduction: A Case Study / F.Xue, N.Zhang, X.Feng, X.Zheng, J.Kan // PLoS ONE. 2015. Vol 10. № 1. e0115874. DOI: 10.1371/journal.pone.0115874
44. Three-zone characterization of coupled strata and gas behavior in multi-seam mining / Q.Qu, J.Xu, R.Wu, W.Qin, G.Hu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 78. P. 91-98. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.04.018

Авторы: А.К.Джигоева, канд. техн. наук, доцент, adadak@mail.ru (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия), В.С.Бригида, канд. техн. наук, научный сотрудник, Iz011@inbox.ru (Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия).

Статья поступила в редакцию 12.06.2020.

Статья принята к публикации 28.09.2020.