

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД ВЗРЫВОМ, РУДНИЧНАЯ
АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА**

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-3-44-53

УДК 622.831.2

**РАЗВИТИЕ ИЕРАРХИИ ГЕОСТРУКТУР
ВО ВМЕЩАЮЩЕМ МАССИВЕ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА
ДЛИННЫМ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ****DEVELOPMENT OF HIERARCHY OF GEOSTRUCTURES
IN THE CONTAINING MASSIF AT WORKING OFF OF COAL LAYER THE LONG
CLEARING FACE**Шинкевич Максим Валериевич^{1,2},кандидат техн. наук, старший научн. сотр., доцент, e-mail: max-valerich@rambler.ru;
Maksim V. Shinkevich^{1,2}, C. Sc. in Engineering, Senior Researcher, Associate Professor,

¹ Институт угля Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» (ИУ ФИЦ УУХ); Россия, 650065, г. Кемерово, проспект Ленинградский, 10

¹ Institute of Coal of The Federal Research Centre of Coal and Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science; Russia, 650065, Kemerovo, Leningradskij, 10

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачев, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

Актуальность, цель работы: геомеханические процессы, происходящие при выемке пласта угля и охватывающие значительные объемы массива горных пород, формируют интенсивные газовые потоки как в выработанное пространство, так и на поверхность, являясь причиной газовой опасности шахт и наземных сооружений. Изучение процессов в возмущенном горными работами массиве позволит прогнозировать их следствия и снизить возможные риски.

Методы исследования: с применением методов рудничной газодинамики показана нелинейность изменения метанообильности выемочного участка с периодом несоизмеримо большим, чем шаг обрушения основной кровли. Основой периодических изменений метановыделения является нелинейность геомеханических процессов. Выполнен анализ измерений давления в стойках механизированной крепи в лавах. Сопоставлялись результаты математического моделирования геомеханических процессов с применением метода конечных элементов и разработанная параметрическая модель.

Результаты: На основе известных закономерностей развития иерархии геоструктур разработана параметрическая модель геомеханических процессов в массиве горных пород с учетом реализации упругой энергии массива при движении длинного очистного забоя. Приведены результаты исследования проявлений горного давления в стойках секций механизированной крепи. Выполнена оценка сходимости параметрической модели с результатами математического моделирования геомеханических процессов с применением метода конечных элементов. Определено, что нелинейная техногенная структуризация вмещающего массива горных пород имеет единую закономерность как для миллионов тонн пород в области влияния длинного очистного забоя (установлено методами рудничной аэрогазодинамики), так и для сотен тонн в его непосредственной окрестности (установлено методами геомеханики по давлению на секции механизированной крепи и численным моделированием).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-45-420001 p_a.

Ключевые слова: Геомеханика, рудничная газодинамика, массив горных пород, упругая энергия,

техногенная структуризация, модель процессов, длинный очистной забой, метанообильность, математическое моделирование.

Abstract:

Relevance, purpose of work: geomechanical processes occurring during coal mining and encompassing significant volumes of rock mass form intense gas flows both into the open space and to the surface, causing the gas hazard of mines and land structures. Examining the processes in the array perturbed by mining will allow to predict their consequences and reduce possible risks.

Research methods: using the methods of mine gas dynamics, the nonlinearity of changes in the methane abundance of the excavation site with a period of disproportionately greater than the collapse step of the main roof is shown. The basis of periodic changes in methane release is the nonlinearity of geomechanical processes. The analysis of pressure measurements in the racks of mechanized supports in lavas was performed. The results of mathematical modeling of geomechanical processes were compared using the finite element method and the developed parametric model.

Results: based on the known regularities of the development of the hierarchy of geostructures, a parametric model of geomechanical processes in the rock mass has been developed taking into account the realization of the elastic energy of the massif during the movement of a long clearing face. The results of the study of the manifestations of rock pressure in the racks of the sections of mechanized supports are presented. The convergence of the parametric model with the results of mathematical modeling of geomechanical processes using the finite element method is estimated. It was determined that the nonlinear technogenic structurization of the host rock mass has a single pattern for both millions of tons of rocks in the area of influence of a long working face (established by mine aerogas dynamics methods) and for hundreds of tons in its immediate vicinity (established by pressure geomechanics methods on the mechanized roof support section and numerical simulation).

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project №18-45 420001.

Key words: Geomechanics, mine gas dynamics, rock mass, elastic energy, technogenic structurization, process model, long clearing face, methane abundance, mathematical modeling.

Подземная разработка угольных месторождений приводит к изменению напряженно-деформированного состояния миллионов тонн горных пород вплоть до образования мульды сдвижения на дневной поверхности. Эти процессы, охватывая значительные объемы углегазоносного массива, формируют интенсивные газовые потоки как в выработанное пространство, так и на поверхность, являясь причиной газовой опасности шахт и наземных сооружений. Одним из путей преодоления этих негативных особенностей является уточнение знаний об основах их возникновения – геомеханических процессах в области ведения горных работ.

Необходимость развития исследований в области геомеханических процессов и их газодинамических следствий при подземной угледобыче обусловлена резким изменением параметров и режимов горных работ в последние десятилетия, а регламентируемые в [1, 2] зависимости обобщают горный опыт всех шахт СНГ за многие десятилетия и ориентированы на вычислительные возможности прошлого века. Например, согласно нормативному документу [2], параметры процесса сдвижения подрабатываемого массива у границ очистной выработки по простиранию определяются углами полных сдвижений, которые для всех условий Кузбасса постоянны и равны 50 градусам. Однако горно-экспериментальными исследованиями [3] установлено, что эти углы на границе очистного забоя в различных горно-геологических условиях на месторождениях Кузбасса непостоянны и зависят от вертикальной координаты подрабатываемого

слоя. При наличии труднообрушаемых кровель на глубинах 150–200 м и при мощности междупластья 5–45 м угол полных сдвижений изменяется от 10 до 41 градуса, а граничный угол составляет 38–58 градусов. Учитывая, что зона обрушения пород составляет 10–12 вынимаемых мощностей, то для пород непосредственной и основной кровли угол полных сдвижений принимается равным 45 градусов. В пределах реальных глубин горных работ его значение может достигать 65 градусов [3].

Результатом ведения горных работ является снижение геостатических напряжений во вмещающем массиве. А поскольку при снижении напряжений из углеметановых пластов выделяется метан, то закономерности изменений напряженного состояния массива служат физической основой интенсивности метановыделения на выемочный участок в зону аэрогазового контроля. Поэтому для уточнения особенностей развития геомеханического процесса, охватывающего миллионы тонн углегазоносных горных пород, достаточно отследить один из его конечных результатов – изменение метанообильности выемочного участка при движении очистного забоя. Такой подход направлен на поиск более эффективных методов решения инженерных задач угледобывающих предприятий на основе современных научных знаний. Даже при формальном отображении информации о динамике метанообильности длинного очистного забоя (рис. 1) в ней была отмечена некоторая системность, заставляющая говорить о волнообразности процесса [4], причем с периодом несоизмеримо большим,

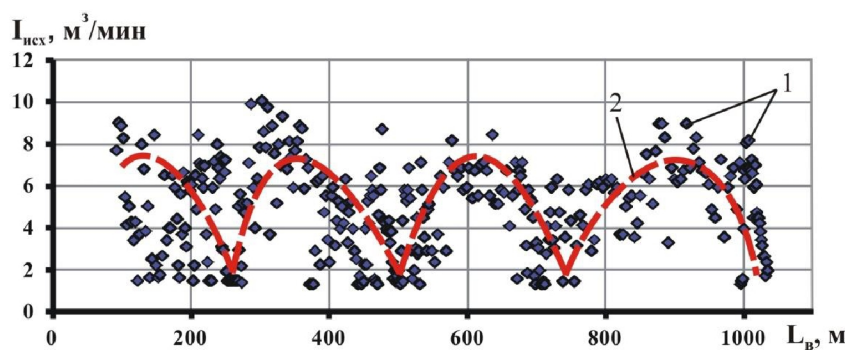


Рис. 1. Фактическое содержание метана в исходящей струе воздуха $I_{исх}$ из очистного забоя № 15–19 шахты «Абашевская» по длине выемочного столба $L_в$
1 – фактические данные; 2 – линия формальной аппроксимации

Fig. 1. The amount of methane in the outgoing stream of air I from the clearing face №15–19 of “Abashevskaya” mine along length of the extraction column L
1 – factual data, 2 – formal approximation line

чем шаг обрушения основной кровли. Фактические данные, показанные на рис. 1, получены с помощью электронных датчиков, установленных в месте подачи воздуха на входе в очистной забой и на выходе из него.

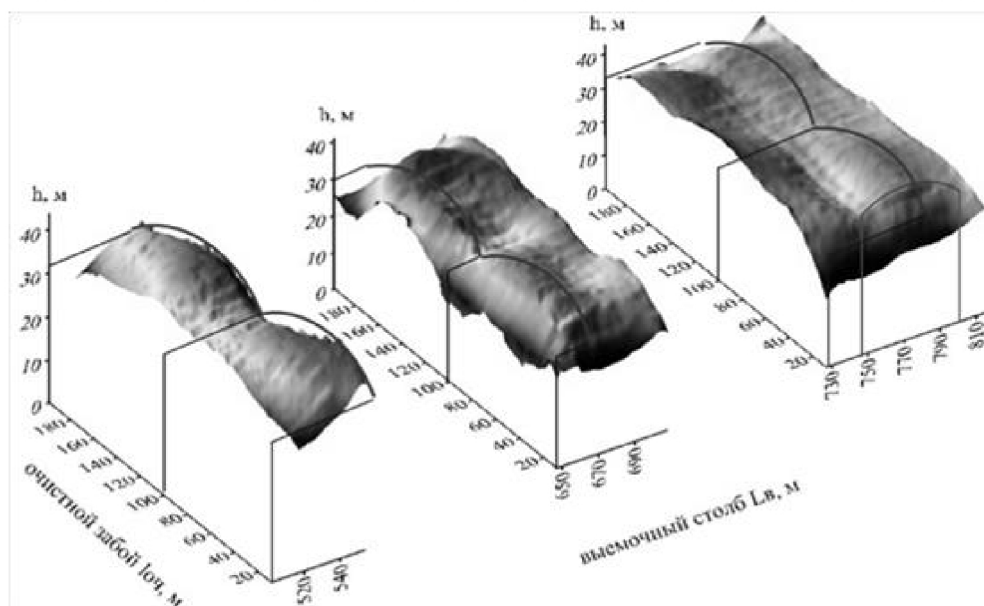
Действующие на шахтах системы мониторинга рудничной атмосферы накапливают информацию по пяти датчикам концентрации метана и расхода воздуха в основных точках выемочного участка за весь период его работы с квантованием до 1 минуты. Тем самым имеется возможность непрерывного отслеживания пространственных параметров техногенных геомеханических процессов при любых размерах выемочных столбов, скоростях продвижения забоев, глубины залегания и газоносности обрабатываемых пластов, размерах межлавных целиков. Нивелирование изменений указанных технологических параметров выполнено при обобщении данных более чем по двадцати выемочным участкам шахт Кузбасса с длинами лав 150–300 м, длинами столбов 1000–2000 м и производительностью 3000–15000 тонн угля в сутки на глубинах ведения горных работ 150–600 м [5–9].

Физические причины нелинейности параметров геомеханических процессов были определены учеными ИГД СО РАН [10, 11]. На этой научной основе для выемочных участков, обрабатывающих пологие угольные пласты длинным очистным забоем с полным обрушением кровли, установлена [7] волновая «подпись» массива горных пород – периодическое изменение доли реализации газового потенциала массива в метанообильности участка по длине выемочного столба. Такая «подпись» уникальна для каждого выемочного участка, так как отражает горно-геологические особенности массива и технологические особенности выемочных участков, что позволяет конкретизировать условия ведения горных работ по обеспечению

допускаемой (по газовому фактору) скорости продвижения забоев и способы управления динамикой метанообильности участков на интервалах их продвижения.

Общим для всех условий отработки угольных пластов является геомеханическая структуризация массива в окрестности выемочного столба, происходящая при движении очистного забоя. Она положена в основу параметрической модели геомеханической структуризации вмещающего массива при ведении подземных горных работ [9]. Эта модель разработана в ИУ ФИЦ УУХ СО РАН и предназначена для решения прикладных газогеохимических задач при проектировании выемочных участков на угольных шахтах с системой отработки пластов длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли. Модель уточняет закономерности классической геомеханики и основана на современных достижениях нелинейной геомеханики в области деформационно-волновой природы геомеханических процессов в окрестности выработок [10–15]. На данный момент модель продолжает совершенствоваться, так как из-за сложности изучаемых геомеханических процессов и многофакторности их влияния на газодинамические процессы массив пока рассматривается в первом приближении без учета изменений механических свойств горных пород.

Отметим, что основную нагрузку при сдвиганиях горных пород в окрестности очистного забоя несет обрабатываемый угольный пласт и крепь очистного забоя. Следовательно, изменения давления в стойках крепи отражают характер происходящих процессов.



1.

Рис. 2. Высоты сводов давления h на секции механизированной крепи при отработке пласта с труднообрушаемой кровлей на шахте «Алардинская» по длине выемочного столба L .

Fig. 2. The height of the pressure arches h on the section of the mechanized support when mining the reservoir with a hard-to-break roof at the «Alardinskaya» mine along the length of the excavation column L .

Таблица 1. Характеристики интервалов, выделенных на рис. 2

Table 1. Characteristics of the intervals highlighted in Fig. 2

Интервал по длине выемочного столба, м	Расстояние от монтажной камеры до максимального давления, м	Средняя скорость подвигания очистного забоя, м/сут
517 – 553	550	2.8
646 – 707	660	1.9
726 – 815	780	2.5

С появлением механизированных комплексов, оснащенных датчиками давления, немецкими учеными в работах [16, 17] приводятся результаты измерений давления в стойках механизированной крепи в лавах. Было доказано, что горное давление вдоль линии забоя имеет волнообразный характер, но эти результаты не получили до настоящего времени соответствующую идентификацию параметров.

Совместным участием инженерно-технических служб шахт и сотрудников Института угля ФИЦ УУХ СО РАН были проведены наблюдения за изменениями давления в стойках секций механизированной крепи в очистных забоях [8, 14]. Ниже приведены данные по одному из рассмотренных объектов.

Объектом исследования являлся отработываемый угольный пласт на Алардинском месторождении Кузбасса, залегающий на глубине 520–660 м. Полная мощность пласта до 5.6 м, вынимаемая мощность – 4.5 м с оставлением пачки угля у почвы пласта. Угол падения пласта 14 градусов. Длина выемочного столба – 1945 м, длина очистного забоя – 220 м. Коэффициент крепости угля $f=1.5$. По мощности пласт переслаивается крепким

алевролитом, мощность его слоев колеблется от 0.1 до 2.1 м, крепостью $f=4-6$. В кровле пласта залегает углистый алевролит мощностью от 0.4 до 0.95 м, средней крепости $f=2-3$. Выше находится слоистый зернистый алевролит средней устойчивости, мощностью 3.3–20.9 м, крепостью $f=6$. Основная кровля представлена крупнослоистым песчаником крепостью $f=6-9$, мощностью от 1.0 до 13.5 м. Вторичные шаги обрушения основной кровли по всей длине выемочного столба составляют около 25 м. В почве пласта залегает среднезернистый слоистый алевролит крепостью $f=5$.

Значения давления в стойках механизированной крепи регистрировались один раз в сутки в ремонтную смену. Для оценки этих значений они интерпретировались через слои пород, оказывающие давление на крепь и называемые сводами давления, высоты которых определяются плотностью пород.

С целью анализа исходной информации, полученной в плоскости выемочного столба, применен программный продукт *Surfer*, а использование метода аппроксимации *Local Polynomial* позволило обработать весь массив данных. Отметим, что при этом динамика процесса «сглаживается» и

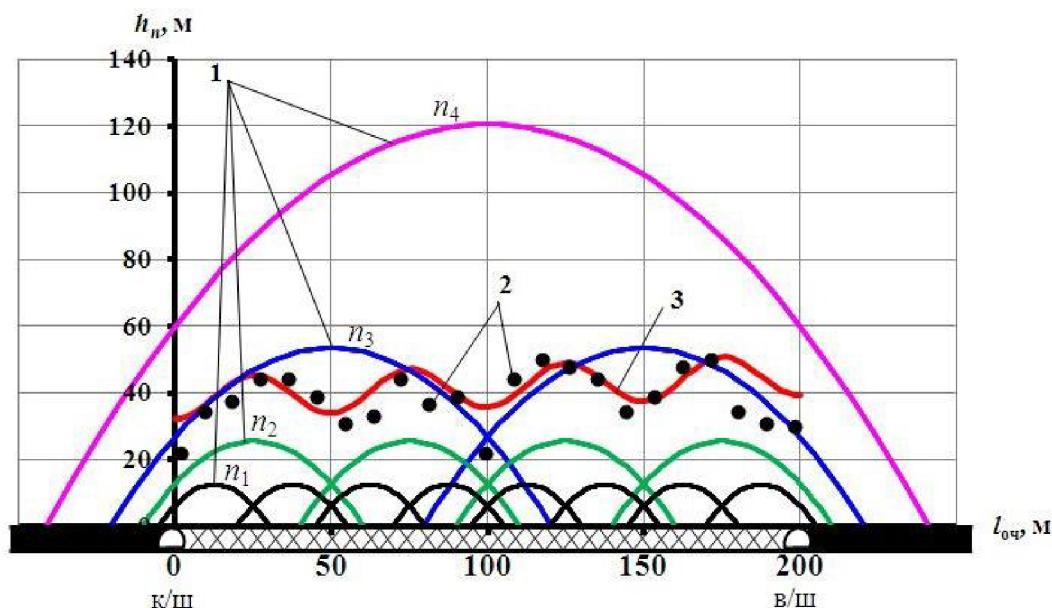


Рис. 3. Проекция на вертикальную плоскость по линии движущегося очистного забоя $l_{оч}$ высот h_n «сводов сдвижений» и сводов давлений в подрабатываемом массиве, поддерживаемом секциями крепи, при отходе лавы № 3–32 от монтажной камеры на 548 м:

1 – «своды сдвижений» n -ых уровней иерархии; 2 – фактические данные о высотах сводов давлений; 3 – аппроксимация фактических данных высот сводов давления; к/ш – конвейерный штрек; в/ш – вентиляционный штрек

Fig. 3. Projections to the vertical plane along the line of the moving clearing face l of the heights h of the "arches of displacement" and pressure arches in the undermined massif, supported by the support sections, when the lava leaves (№ 3–32) the assembly chamber by 548 meters.

1 – "Sets of shifts" of hierarchy levels; 2 – actual data on the height of pressure vaults; 3 – approximation of the actual data of the heights of pressure vaults.

экстремальные значения снижаются на 20% от фактических данных.

Результаты обработки данных приведены на рис. 2. На рисунке отчетливо проявляется периодичность изменений как по линии очистного забоя, так и по длине выемочного столба. Три интервала наблюдений соответствуют имеющимся фактическим данным о давлениях в стойках механизированной крепи.

Характеристики выделенных на рис. 2 интервалов по длине выемочного столба приведены в таблице 1.

С учетом данных о динамике метанообильности (рис. 1) следует принять, что геометрия фронта сдвижений имеет вид свода, образованного длинным очистным забоем, в пределах которого, согласно закону иерархии структур [11, 18, 19], формируются вложенные своды, включая своды давления на секции механизированной крепи (рис. 3).

Из графиков на рис. 3 видно, что синусоидальные изменения регистрируемой высоты сводов давления по линии очистного забоя имеют период, соответствующий верхней половине сводов уровня иерархии n_2 , амплитуду изменений – близкую уровню n_1 , а их средняя линия находится на удалении от пласта $n_1 + n_2$.

Представленные результаты показывают достаточную адекватность параметров техногенной структуризации вмещающего массива, устанавливаемых комплексным методом геомеханики и рудничной аэрогазодинамики, поясняя причины регистрируемой системой аэрогазового контроля неравномерности метанообильности (рис. 1). Поскольку расположенные во вмещающих породах разрабатываемые газоносные угольные пласты и пласты-спутники на различных интервалах как отработки столба, так и по длине очистного забоя разгружаются от горного давления неравномерно, то, используя эту закономерность, можно с достаточной надежностью прогнозировать изменения состояния вмещающих пород при движении очистного забоя.

Исследования техногенных газогеохимических процессов в углегазонасыщенных массивах и разработка способов снижения их негативного влияния на безопасность горных работ активно проводятся в ряде научно-исследовательских институтов [20–29]. Успешное развитие комплексной модели этих процессов, адекватно отражающей такие техногенные изменения, как напряжения, разгрузка, сдвиги, дезинтеграция вмещающего массива, их газодинамические следствия и др., повышает

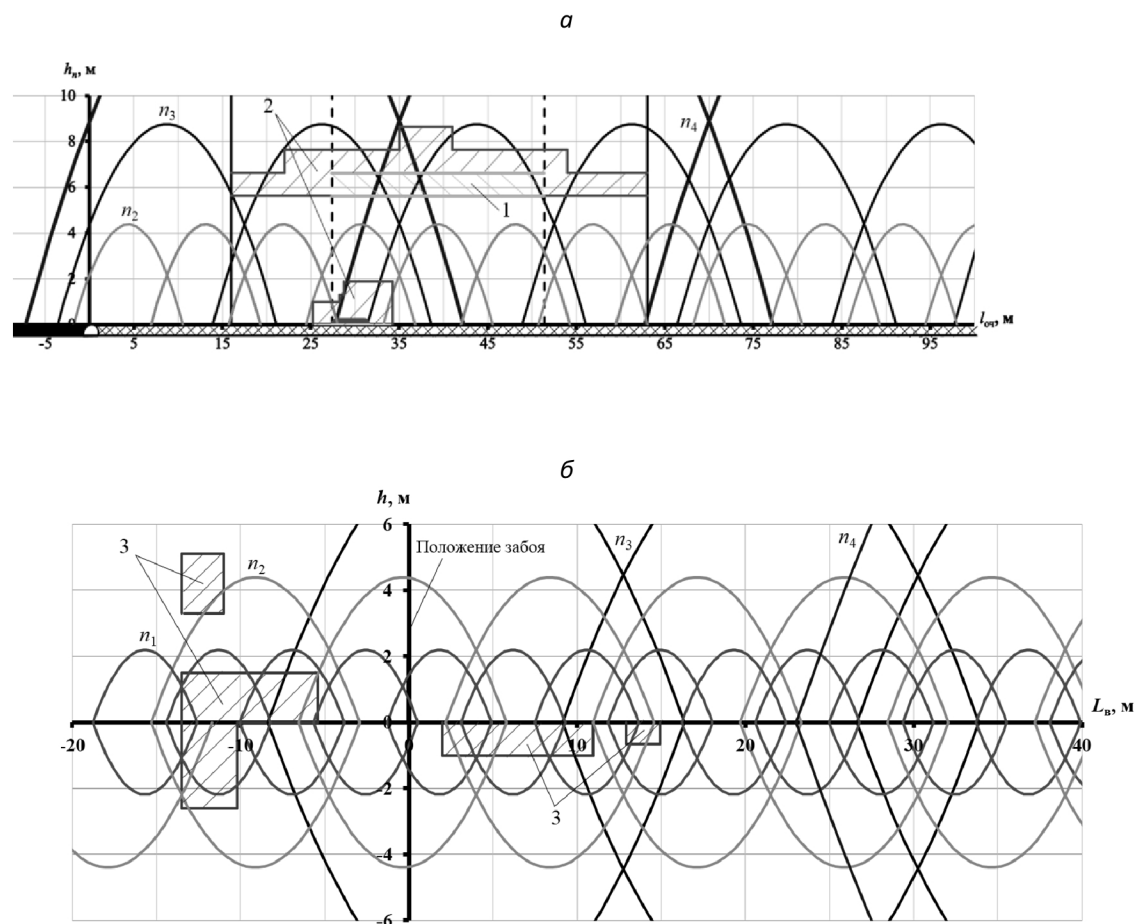


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета зон дезинтеграции (1, 2, 3) методом конечных элементов

с данными параметрической модели техногенного развития иерархии геоструктур:

а – вертикальная плоскость, нормальная линии очистного забоя $l_{оч}$;

б – вертикальная плоскость по длине выемочного столба L_v

Fig. 4. comparison of the results of the calculation of the zones of disintegration (1, 2, 3) by the finite element method

with the data of the parametric model of technogenic development of the hierarchy of geostructures:

а – vertical plane, normal clearing face l ;

б – vertical plane along the length of the notch column L

эффективность технологических решений на стадии проектирования и ведения горных работ.

Несомненный интерес представляет оценка сходимости параметрической модели результатам математического моделирования геомеханических процессов с применением метода конечных элементов. В работе немецких ученых [17] вычислительный эксперимент приведен с описанием условия ($l_{оч} = 140$ м), достаточного для частичной реализации параметрической модели. Целью вычислений являлось выявление зон дезинтеграции вмещающего массива в окрестности очистного забоя. На рис. 4 представлены результаты математического моделирования на фоне параметрической модели развития иерархии сводов-параболоидов.

Вертикальная плоскость по линии очистного забоя (рис. 4а). С применением метода конечных

элементов установлено [17], что при глубине залегания пласта 600 м и начальном распоре крепи 164 бар дезинтеграция вмещающих пород отсутствует. При начальном распоре крепи 134 бар вычисляется зона дезинтеграции (1), расположенная на интервале 28 – 52 м от штрека (пунктирные линии на рис. 4а) и примерно в 6 м от пласта. При этом же распоре крепи по основной протяженности забоя, но на участке 26–32 м, сниженном до 15 бар, зона (2) охватывает уже интервал 16–63 м (вертикальные сплошные линии на рис. 4а) и увеличивает свою мощность в три раза, а непосредственно над пластом на интервале 26–32 м образуется зона (2) мощностью до 2 м.

Сопоставляя эти результаты с иерархией сводов параметрической модели, можно отметить, что центры зон дезинтеграции (1, 2) расположены

близко к вершине свода 5-го уровня иерархии (свод уровня n_5 и свод уровня n_6 , соответствующего длине очистного забоя, на рис. 4 не показаны). Увеличение длины зон происходит в пределах этого свода, а мощности – в пределах изменения высоты сводов n_3 и n_2 или нижней половины сводов уровня n_4 . Зона дезинтеграции непосредственно над разгруженными секциями крепи соответствует нижней половине контура свода 1-ого уровня иерархии.

В вертикальной плоскости по длине выемочного столба (рис. 4б) расчетные контуры зон дезинтеграции (3) как впереди очистного забоя, так и позади него согласуются со сводами уровня n_1 .

Сравнивая данные на рис. 3 и 4, следует отметить интересную особенность: положение верхних границ зон дезинтеграции по высоте от пласта резко отличаются. Физическая причина этого отличия в том, что данные на рис. 3 получены при скорости продвижения забоя 3 м/сут, а исследования немецких ученых соответствуют скорости около 20 м/сут. К тому же в работе [17] нет информации об отходе лавы от монтажной камеры, а этот технологический параметр является значимым в понимании состояния вмещающего массива в непосредственной окрестности забоя. По этой причине параметрическая модель реализована для интервала отхода очистного забоя от монтажной камеры примерно на половину его длины, то есть для наиболее напряженной геомеханической ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нелинейная техногенная структуризация вмещающего массива горных пород имеет единую закономерность как для миллионов тонн пород в области влияния длинного очистного забоя (установлено методами рудничной аэрогазодинамики), так и для сотен тонн в его непосредственной близости (установлено методами геомеханики по давлению на секции механизированной крепи и численным моделированием). Для повышения надежности расчетов параметров газогеохимических процессов при ведении горных работ необходимо учитывать особенности упругой реакции массива в целом, а не только отрабатываемого пласта и ближайших к нему слоев. Возможно, установленные особенности канонической иерархии геоструктур будут востребованы и для математического моделирования газогеохимических процессов методом конечных элементов. Так как основой периодических изменений метановыделения является нелинейность геомеханических процессов, то разработанная параметрическая модель применима при решении задач прогноза динамики метанообильности выемочных участков на угольных шахтах с системой отработки пластов длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. (Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01.12.2011 г. № 680). – 126 с.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ на угольных месторождениях. – СПб., 1998. – 291 с.
3. Калинин С.И., Колмагоров В.М. Геомеханическое обеспечение эффективной выемки мощных толстых пластов с труднообрушаемой кровлей механизированными комплексами. – Кузбассвуиздат, 2002. – 113 с.
4. Полевщиков Г.Я., Шинкевич М.В., Радченко А.В., Леонтьева Е.В., Черепов А.А. Фрактальная особенность структуризации массива горных пород в изменениях давления на призабойную часть отрабатываемого длинным очистным забоем угольного пласта // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1. – С. 16–23.
5. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н. Адаптивный прогноз метанообильности очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – № 7. – С. 35–39.
6. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Киряева Т.А., Шинкевич М.В., Брюзгина О.В., Рябцев А.А., Назаров Н.Ю., Плаксин М.С. Снижение газодинамической опасности подземных горных работ // Уголь. – 2007. – № 11 (979). – С. 13–16.
7. Козырева Е.Н. Динамика метанообильности выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – Отд. вып. № 6. – С. 238–244.
8. Шинкевич М.В. Газовыделение из отрабатываемого пласта с учетом геомеханических процессов во вмещающем массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – Отд. вып. № 6. – С. 278–285.

9. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В., Леонтьева Е.В. Параметрическая модель техногенного развития иерархии геоструктур в массиве горных пород // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. Гос индустр. Ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2015. – С. 143–148.
10. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.N., Glushikhin F.P., Rozenbaum M.A., Tropp E.A., Kuznetsov Y.S. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part iii: theoretical concepts // Soviet Mining Science. – 1987. – Vol. 23. – № 1. – P. 1.
11. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 3. – С. 12–26.
12. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П., Розенбаум М.А. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. / Боспорские исследования. – 1992. – № 1.
13. Опарин В.Н. К вопросу формирования информационной геомеханической модели строения Кузнецкого угольного бассейна / В.Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 3. – С. 224–244.
14. 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. 50–60.
15. Опарин В.Н. Современные достижения нелинейной геотехники и методологические основы для построения мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности на горнодобывающих предприятиях // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 6–15.
16. Ройтер М., Курфюст В., Майрховер К., Векслер Ю. Волнообразное распределение горного давления вдоль забоя лавы // ФТПРПИ. – 2009. – № 2. – С. 38 – 45.
17. Ройтер М., Крах М., Майрхофер К., Кислинг У., Векслер Ю. Мониторинг динамических проявлений горного давления в системе управления МАРКО “Цифровая шахта” // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / сиб. Гос индустр. Ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк. – 2015. – С. 33–39.
18. Шемякин Е.И. О свободном разрушении свободных тел. II // Доклады академии наук. — 1988. — Том 300. — № 5. — С. 1090 – 1094.
19. Опарин В.Н., Танайно А.С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении // Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала. – Новосибирск: Наука. – 2011. – 228 с.
20. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Полевщиков Г.Я., Родин Р.И. Определение коэффициента диффузии и содержания газа в пласте на основе решения обратной задачи по данным измерения давления в герметичной емкости с угольным веществом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 5. – С. 15–23.
21. Полевщиков Г.Я., Родин Р.И., Рябцев А.А., Назаров Л.А., Назарова Л. А. Особенности дегазации высокогазоносных угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2014. – № 1. – Т. 2. – С. 27–34.
22. Клишин В.И., Курленя М.В. Создание оборудования для дегазации угольных пластов на принципе гидроразрыва горных пород // Уголь. – 2011. – № 10. – С. 34–39.
23. Клишин В.И., Писаренко М.В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли // Уголь. – 2014. – № 9. – С. 42–46.
24. Клишин С.В., Клишин В.И., Опрук Г.Ю. Моделирование процесса выпуска угля при механизированной отработке мощных крутопадающих угольных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. — С. 105–116.
25. 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. – С. 31–35.

26. Черданцев Н.В., Шадрин А.В. Расчет траектории движения одиночной трещины, расположенной в массиве горных пород, нагруженной давлением жидкости // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 4. – С. 18–26.
27. Тайлаков О.В., Тайлаков В.О., Макеев М.П., Соколов С.В., Кормин А.Н. К оценке ресурсов шахтного метана в выработанном пространстве. // Отдельный выпуск Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № ОВ 6. – С. 160–165.
28. Портола В.А. Эндогенная пожароопасность шахт в условиях управления газовыделением средствами вентиляции // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 9. – С. 32–35.
29. Плаксин М.С. Развитие метода автоматизированного контроля газодинамической активности призабойной зоны угольного пласта при проведении подготовительных выработок // Вестник Научного центра по безопасности работ угольной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 23–28.

REFERENCES

1. Instruksiya po primeneniyu skhem provetrivaniya vyemochnykh uchastkov shakht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshch'yu gazootsa-syvayushchikh ustanovok. (Utv. prikazom Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 01.12.2011 g. № 680). – 126 s.
2. Pravila okhrany sooruzheniy i prirodnykh ob"ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornykh razrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh. – SPb., 1998. – 291 s.
3. Kalinin S.I., Kolmagorov V. M. Geomekhanicheskoe obespechenie effektivnoy vyemki moshchnykh pologikh plastov s trudnoobrashaemoy krovley mekhanizirovannymi kompleksami. – Kuzbassvuzizdat, 2002. – 113 s.
4. Polevshchikov G.Ya., Shinkevich M.V., Radchenko A.V., Leont'eva E.V., Cherepov A.A. Fraktal'naya osobennost' strukturizatsii massiva gornykh porod v izmeneniyakh davleniya na prizaboynuyu chast' otrabatyvaemogo dlinnym ochistnym zaboem ugol'no-go plasta // Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. — 2013. – № 1. – S. 16–23.
5. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N. Adaptivnyy prognoz metanoobil'nosti ochistnogo zaboya // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). – 2000. – № 7. – S. 35–39.
6. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Kiryaeva T.A., Shinkevich M.V., Bryuzgina O.V., Ryabtsev A.A., Nazarov N.Yu., Plaksin M.S. Snizhenie gazodinamicheskoy opasnosti podzemnykh gornykh rabot // Ugol'. – 2007. – № 11 (979). – S. 13–16.
7. Kozyreva E.N. Dinamika metanoobil'nosti vyemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). – 2013. – Otd. vyp. № 6. – S. 238–244.
8. Shinkevich M.V. Gazovydelenie iz otrabatyvaemogo plasta s uchetom geomeo-mekhanicheskikh protsessov vo vmeshchayushchem massive // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). – 2013. – Otd. vyp. № 6. – S. 278–285.
9. Kozyreva E.N., Shinkevich M.V., Leont'eva E.V. Parametricheskaya model' tekhnogenno razvitiya ierarkhii geostруктур v massive gornykh porod // Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: sb. nauch. ctatey / Sib. Gos industr. Un-t; pod obshchey red. V.N. Fryanova. – Novokuznetsk, 2015. – S. 143–148.
10. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.N., Glushikhin F.P., Rozenbaum M.A., Tropp E.A., Kuznetsov Y.S. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part iii: theoretical concepts // Soviet Mining Science. — 1987. – Vol. 23. – № 1. – P. 1.
11. Kurlenya M.V., Oparin V.N. Problemy nelineynoy geomekhaniki // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 1999. – № 3. – S. 12–26.
12. Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.N., Glushikhin F.P., Rozenbaum M.A. Otkrytie № 400. Yavlenie zonal'noy dezintegratsii gornykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok. / Bosporskie issledovaniya. – 1992. – № 1.
13. Oparin V.N. K voprosu formirovaniya informatsionnoy geomekhanicheskoy modeli stroeniya Kuznetskogo ugol'nogo basseyna / V.N. Oparin [i dr.] // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh

iskopaemykh. – 2006. – № 3. – S. 224–244.

14. Polevshchikov G.Ya. “Deformatsionno-volnovyye” protsessy v massive gornykh porod pri dvizhenii ochistnogo zaboya v ugol'nykh plastakh // Fiziko-tehnicheskie pro-blemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2013. – № 5. – S. 50–60.

15. Oparin V.N. Sovremennyye dostizheniya nelineynoy geotekhniki i metodologicheskiye osnovy dlya postroeniya monitoringovykh sistem geomekhaniko-geodinamicheskoy bezopasnosti na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh // Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. – 2015. – № 1. – S. 6–15.

16. Royter M., Royter M., Kurfyust V., Mayrkhofer K., Veksler Yu. Volnoobraznoye raspredeleniye gornogo davleniya vdol' zaboya lavy // FTPRPI. – 2009. – № 2. – S. 38–45.

17. Royter M., Krakh M., Mayrkhofer K., Kisling U., Veksler Yu. Monitoring dinamicheskikh proyavleniy gornogo davleniya v sisteme upravleniya MARKO “Tsifro-vaya shakhta” // Naukoemkiye tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: sb. nauch. statey / sib. Gos industr. Un-t; pod obshchey red. V.N. Fryanova. – Novokuznetsk. – 2015. S. – 33–39.

18. Shemyakin E.I. O svobodnom razrushenii svobodnykh tel. II // Doklady akademii nauk. – 1988. – Tom 300. – № 5. – S. 1090 – 1094.

19. Oparin V.N., Tanayno A.S. Kanonicheskaya shkala ierarkhicheskikh predstavleniy v gornom porodo-vedenii // Ros. akad. nauk, Sibirskoye otdeleniye, Institut gor-nogo dela im. N. A. Chinakala. – Novosibirsk: Nauka. – 2011. – 228 s.

20. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Polevshchikov G.Ya., Rodin R.I. Opredeleniye koeffitsienta diffuzii i sodержaniya gaza v plaste na osnove resheniya obratnoy zadachi po dannym izmereniya davleniya v germetichnoy emkosti s ugol'nyim veshchestvom // Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2012. – № 5. – S. 15–23.

21. Polevshchikov G.Ya., Rodin R.I., Ryabtsev A.A., Nazarov L.A., Nazarova L.A. Osobennosti degazatsii vysokogazonosnykh ugol'nykh plastov // Fundamental'nye i prikladnyye voprosy gornykh nauk. Novosibirsk: IGDA SO RAN. – 2014. – № 1. – T. 2. – S. 27–34.

22. Klishin V.I., Kurlenya M.V. Sozdaniye oborudovaniya dlya degazatsii ugol'nykh plastov na printsipe gidrorazryva gornykh porod // Ugol'. – 2011. – № 10. – S. 34–39.

23. Klishin V.I., Pisarenko M.V. Nauchnoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya ugol'noy otrasli // Ugol'. – 2014. – № 9. – S. 42–46.

24. Klishin S.V., Klishin V.I., Opruk G.Yu. Modelirovaniye protsessa vypuska uglya pri mekhanizirovannoy otrabotke moshchnykh krutopadayushchikh ugol'nykh plastov // Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2013. – № 6. – S. 105–116.

25. Shadrin A.V., Klishin V.I. Sovershenstvovaniye metodov avtomatizirovannogo prognoza opasnosti proyavleniya dinamicheskikh yavleniy v protsesse razuprochneniya krovli i profilakticheskoy gidroobrabotki ugol'nykh plastov // Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti. – 2017. – № 3. – S. 31–35.

26. Cherdantsev N.V., Shadrin A.V. Raschet traektorii dvizheniya odinochnoy treshchiny, raspolozhennoy v massive gornykh porod, nagruzhennoy davleniem zhidkosti // Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti. – 2017. – № 4. – S. 18–26.

27. Taylakov O.V., Taylakov V.O., Makeev M.P., Sokolov S.V., Kormin A.N. K otsenke resursov shakhtnogo metana v vyrabotannom prostranstve. // Otdel'nyy vypusk Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal). – 2013. – № OV 6. – S. 160–165.

28. Portola V.A. Endogennaya pozharoopasnost' shakht v usloviyakh upravleniya gazovyim sredstvami ventilyatsii // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2006. – № 9. – S. 32–35.

29. Plaksin M.S. Razvitiye metoda avtomatizirovannogo kontrolya gazodinamicheskoy aktivnosti prizaboynoy zony ugol'nogo plasta pri provedenii podgotovitel'nykh vyrabotok // Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot ugol'noy promyshlennosti. – 2014. – № 2. – S. 2–28.

Поступило в редакцию 22.04.2019

Received 22 April 2019