



ПОДГОТОВКА ВЫБРОСА УГЛЯ ВЗРЫВОМ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА

В. Н. Одинцев, В. А. Трофимов, И. Е. Шиповский

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru, shipovskiy_i@ipkonran.ru,
Крюковский тупик 4, г. Москва 111020, Россия*

Рассмотрен механизм взрывного разрушения угля с помощью комбинированной модели газонасыщенного угля, описывающий связь между взрывным повреждением угольного пласта и последующим выделением газа. На основе этой модели численным методом сглаженных частиц изучается развитие зон разрушения и напряженно-деформированное состояние пласта в окрестности скважинного заряда после взрыва. Полученные закономерности помогают прогнозировать реакцию угля на взрывное динамическое воздействие. Это может представлять значительный интерес для развития технологии предварительной дегазации угольных пластов, а также теоретического описания процессов, протекающих при возникновении выбросов угля и газа. В связи с этим рассматривается механизм подготовки газодинамического разрушения пачки выбросоопасного (“перемятого”) угля при взрывном воздействии на угольный пласт. Исследование включает изучение условий образования трещин в дальней от взрывной скважины зоне, моделирование наполнения наведенных трещин метаном, который изначально находится в угле в растворенном состоянии, и оценку времени начала развития наведенной трещины за счет давления свободного метана в трещине. Установлено, что в зависимости от механических и диффузионных параметров угля время старта развития трещин может варьировать от десятков секунд до многих часов. Результаты исследования могут быть полезны при разработке теории взрывного воздействия на угольный пласт, используемого на практике в комплексе мер снижения опасности внезапных выбросов угля и газа.

Перемятый уголь, взрывные работы, выбросы угля и газа, взрывное воздействие, динамическое воздействие, метанонасыщенный пласт, предразрушение, компьютерное моделирование

SIMULATION OF COAL OUTBURST BY BLASTING BOREHOLE CHARGE

V. N. Odintsev, V. A. Trofimov, and I. E. Shipovskii

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
E-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru, shipovskiy_i@ipkonran.ru,
Kryukovskiy tupik 4, Moscow 111020, Russia*

The mechanism of blasting destruction of coal is considered using a combined model of gas-saturated coal, which describes the relationship between explosive damage of a coal seam and subsequent gas release. On the basis of this model, the numerical method of smoothed particles is used to study the development of destruction zones and stress-strain state of a coal seam in the vicinity of a borehole charge after blasting. The obtained patterns help to predict the reaction of coal to explosive dynamic impact. This may be of considerable interest for the development of technology for preliminary degassing of coal seams, as well as for theoretical description of the processes occurring during coal and gas emissions. In this regard, the preparation mechanism of gas-dynamic fracture of a stack of outburst-hazardous (broken) coal under explosive action on a coal seam is considered. The research includes studying the conditions for crack formation in the zone farthest from the blast hole, modeling the filling of induced cracks with methane, which is initially in the coal in a dissolved state, and estimating the onset time of induced crack propagation due to free methane pressure in the crack. It was found that, depending on the mechanical and diffusion

parameters of coal, the crack initiation time can vary from tens of seconds to many hours. The research results can be useful in the development of a theory of explosive action on a coal seam, which is used in a set of measures to reduce the hazard of sudden coal and gas emissions.

Broken coal, blasting, coal and gas emissions, explosive action, dynamic impact, methane-saturated seam, pre-fracture, computer simulation

Природная горно-геологическая система каменного угля и сорбированного им газа в течение десятилетий является предметом фундаментальных и прикладных исследований [1, 2]. Интерес к этому предмету обусловлен необходимостью решения ряда актуальных проблем, в частности, предотвращения опасных газодинамических явлений в угольных шахтах, добычи метана из угольных пластов, захоронения углекислого газа. Несмотря на определенный технологический прогресс в решении этих проблем, многие научные аспекты взаимодействия угольного вещества и газа остаются не изученными в должной мере.

При подземной разработке угольных пластов часто возникают проблемы, связанные с дисбалансом природной угольно-метановой системы [2, 3]. В некоторых случаях во время антропогенного воздействия на угольный пласт выделяется чрезвычайно большое количество метана, что приводит к катастрофическим последствиям — взрывам метана или выбросам угля и газа.

Механизм подготовки и проявления внезапных выбросов в полной мере не ясен до сих пор. Многообразие природных условий порождает различные механизмы формирования выбросоопасных ситуаций в выработках, и, следовательно, должны разрабатываться различные теоретические представления о характере возникновения и протекания газодинамических явлений, а также методики прогнозирования выбросов и снижения их опасных последствий.

Выбросы угля и газа при подземной добыче создают серьезные трудности для угольной промышленности, предотвращение которых требует интенсивных дорогостоящих исследований, инженерных разработок и выбора наиболее подходящих режимов вентиляции и дегазации [3]. В этой связи весьма востребован поиск эффективных решений для прогнозирования и практического снижения опасности выбросов угля и газа [4]. Высокое содержание газа в угле является одним из наиболее важных факторов, влияющих на процесс извлечения метана из угольных пластов, однако из-за низкой проницаемости пластов, что обычно наблюдается на многих угольных месторождениях глубокого залегания, этот фактор не обязательно гарантирует высокий выход газа [5]. Чтобы увеличить проницаемость угольного пласта и улучшить выход газа, обычно проводятся технологические мероприятия, такие как гидроразрыв пласта, гидроабразивная обработка, а также динамическое воздействие [6]. Сотрясающее взрывание непосредственно влияют на существующие в угле трещины, которые развиваются вследствие изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород [7, 8].

При проведении сотрясающих взрывов импульс давления продуктов детонации заряда взрывчатого вещества приводит к двум типам нагружения стенок скважины. Это воздействие взрывной волны напряжения и более продолжительное действие давления продуктов детонации. Волна напряжений создает зоны разрушения и инициирует развитие окружающих радиальных трещин, а давление продуктов детонации способствует дальнейшему развитию разрушения и расширению трещин. Регулирование образования трещин вокруг скважины во время взрывных работ может осуществляться путем контроля формы волны взрывного напряжения [9, 10].

В связи с этим для оценки газовыделения при сотрясающем взрывании в поврежденном угольном пласте, а также для прогнозирования характера последующей дегазации пласта, возникающее движение газа совместно с наведенными взрывом деформациями и разрушением угля следует рассматривать как единый взаимосвязанный процесс.

За последние десятилетия накоплен определенный опыт по численному моделированию взрывного разрушения и расчету выделения газа в угольном пласте [10–16]. В вычислительной практике разработан ряд методов для моделирования разгрузки пласта и учета выделения газа при подземной разработке. Эти методы предлагают эффективный инструмент для повышения точности и качества контроля газа, выбора технологий дегазации и вентиляции. Однако природа механизма дегазации нагруженного и разрушенного угольного пласта до сих пор не до конца понятна в контексте единого процесса “нагружение – разрушение – выделение газа” в угольной выработке.

С целью дальнейшего изучения указанной проблемы в данной статье предлагается комбинированная модель газонасыщенного угольного пласта для описания взаимосвязи между взрывным повреждением угольного пласта и выделением газа. На основе этой модели с использованием численного моделирования изучается развитие зоны разрушения и рассчитывается напряженно-деформированное состояние угольного пласта вблизи забоя до и после взрывного воздействия.

Взрывное воздействие на угольный пласт при сотрясательном взрывании с одной стороны может спровоцировать газодинамическое разрушение части угольного пласта в виде локального выброса угля и газа, с другой — создать условия для спокойной дегазации угольного пласта и последующего снижения вероятности выброса угля и газа (при торпедировании пласта) [17–22]. Неоднозначное влияние взрывного воздействия на метанонасыщенный угольный пласт не получило пока теоретического объяснения, хотя предпринимаются отдельные разноплановые исследования [23–25]. Цель настоящей работы — исследование воздействия взрывной волны на наиболее выбросоопасный (“перемятый”) уголь для объяснения разной реакции пласта на взрывное воздействие и выявления возможного параметра управления этой реакцией.

Исходные положения. Одним их принципиальных вопросов газодинамического разрушения угольного пласта является вопрос о возможной роли в этом процессе метана, находящегося внутри угольного вещества в абсорбированном (растворенном) состоянии (до 90 % от всего количества) [1, 26–28]. Вследствие относительно большого времени его перехода в свободное состояние (диффузии молекул до фильтрационного канала и десорбции) растворенный метан не может участвовать в динамическом разрушении угольного пласта.

Новой идеей, положенной в основу наших исследований, является концепция активного участия растворенного метана в стадии предразрушения угля. Далее она развивается в отношении подготовки к разрушению пачки нарушенного перемятого угля при взрывном воздействии.

Характерная особенность перемятого угля состоит в том, что он фактически не содержит макропор и в нетронутом виде фактически непроницаем в отношении фильтрации газа [1, 29]. Чтобы понять особенности взрывного воздействия на выбросоопасный уголь необходимо учесть результаты экспериментов и аналитических оценок по изменению состояния пород при взрывном воздействии в дальней от взрыва зоне [30–34]. В экспериментальных исследованиях установлено, что взрывная волна изменяет природную нарушенность пород на достаточно большом расстоянии от центра взрыва. В зоне, удаленной от центра взрывной полости на расстояние свыше 20 радиусов заряда и простирающуюся на расстояние до 100 радиусов заряда, наведенная пористость может возрастать на несколько процентов. Эту зону следует трактовать как зону взрывного предразрушения пород.

В газоносных угольных пластах свободный метан, образующийся в результате десорбции из угольного вещества связанного метана, локализуется во вновь образованных трещинах, постепенно поднимая в них давление и создавая условия для дальнейшего разрушения твердого угля. Таким образом, область взрывного предразрушения угля по прошествии некоторого времени может стать метастабильной областью в угольном пласте, способной к газодинамическому саморазрушению.

Моделирование действия взрывной волны. При взрывном разрушении породы энергия заряда в форме потенциальной химической энергии проявляется при детонации, частично как кинетическая энергия, содержащаяся во взрывной волне сжатия, и частично как энергия, содержащаяся в расширяющихся продуктах детонации взрывчатого вещества.

Взрывная волна сжатия и давление продуктов детонации приводят к фрагментации монолитной породы в результате ее разрушения и развития существующих и образовавшихся трещин. Скорость детонации взрывчатых веществ значительно выше скорости деформирования породы, поэтому поверхность породы воспринимает действие взрыва практически одновременно по всей площади контакта заряда с массивом, что позволяет рассматривать задачу в плоской постановке. На границе раздела заряд – порода детонационная волна превращается во взрывную волну сжатия с высокой амплитудой, которая вызывает дробление горной породы, изначально находящуюся в условиях всестороннего неравномерного сжатия под действием естественного горного давления (рис. 1).

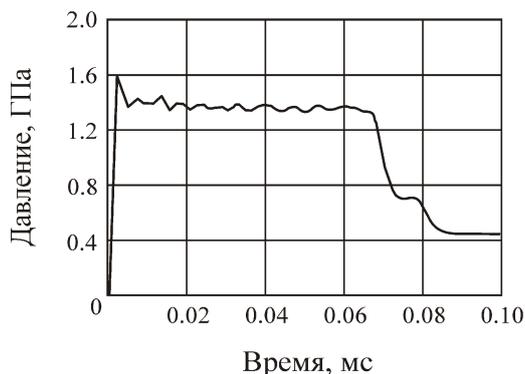


Рис. 1. Действие импульса давления, создаваемого продуктами детонации скважинного заряда взрывчатого вещества в центре скважины

По мере удаления от заряда амплитуда волны резко уменьшается и на расстоянии 5–6 радиусов заряда превращается в волну упругого напряжения, скорость распространения которой меньше скорости ударной волны и равна скорости звука в породе. Однако амплитуда взрывной волны остается значительно выше, чем прочность на одноосное сжатие породы, в результате чего при ее прохождении наблюдается интенсивное разрушение массива, часто с потерей его первоначальной структуры. Обычно эту зону характеризуют как зону измельчения или пластического действия взрыва. Обычно она ограничена 10–12 радиусами заряда. После прохождения взрывной волны определенное разрушающее воздействие в этой зоне также оказывают взрывные газы, находящиеся под высоким давлением.

Под действием взрывной волны и взрывных газов порода вблизи заряда быстро сжимается и смещается за фронтом волны напряжения. Из-за этого формируется зона сильно деформирующейся породы с системой многочисленных пересекающихся трещин. По мере удаления от заряда напряжение в породе от взрыва уменьшается и на определенном расстоянии становится меньше сопротивления раздавливанию породы, в результате чего изменяется характер деформации и разрушения.

Под действием прямой волны напряжений и сжатых взрывных газов, распространяющихся из зоны заряда, сжимающие напряжения возникают в среде в радиальном направлении, а растягивающие — в тангенциальном, что вызывает появление радиальных трещин. Порода деформируется под высоким давлением, и радиусы условных зон, распределенных вокруг заряда с различным типом повреждений, будут увеличиваться. За счет этого порода в радиальных направлениях будет испытывать растягивающие напряжения, которые обеспечивают развитие в массиве вокруг заряда радиальных трещин.

При дальнейшем удалении волны деформации от заряда растягивающие тангенциальные напряжения уменьшаются и становятся меньше предела прочности породы. Следовательно, за пределами этого расстояния разрушения не произойдет и будут возникать сейсмические колебания. После того как давление газа в центре взрыва уменьшится, сильно сжатая порода будет разгружаться и смещаться к центру заряда, вследствие чего уменьшится условный радиус сферы воздействия, а участки породы, прилегающие к полости будут испытывать растягивающие напряжения в радиальных направлениях. В результате этого в породе появляется ряд кольцевых тангенциальных трещин.

Взрывная волна при шахтных взрывах не является ударной, поэтому при моделировании рассматривалась волна напряжений в сплошной однородной упругой среде. Волна обусловлена резким ростом давления газообразных продуктов при детонации ВВ в скважине.

Исследования, начатые аналитически для сферической взрывной камеры и описанные в [34], были продолжены численно с помощью компьютерного моделирования динамических процессов, основанного на комбинации метода конечных элементов и метода сглаженных частиц. Бессеточная основа лагранжевого метода сглаженных частиц исключает вычислительные ограничения на величину деформации среды при детонации ВВ и разлете продуктов детонации.

Известно, что на фронте волны, по мере ее продвижения, радиальное и окружное напряжения сначала являются сжимающими (здесь отрицательными), но затем становятся растягивающими (положительными). На рис. 2 показано изменение со временем радиальных и окружных напряжений σ , порожденных волной при взрыве заряда TNT со скоростью детонации 6930 м/с в шпуре с радиусом $r = 2$ см. По оси ординат отложены напряжения, отнесенные к максимальной величине напряжений сжатия в шпуре при детонации ($Q^* = 9.7915$ ГПа), по оси абсцисс — время τ (в микросекундах) от момента прихода взрывной волны в рассматриваемую точку. Видно, что наибольшую величину на фронте волны имеет растягивающее радиальное напряжение, в абсолютных единицах величина растяжения может составлять 300 МПа. Продолжительность импульса растяжения превышает 20 мкс, причем в точке на расстоянии $50r$ импульс растяжения является более продолжительным (около 30 мкс), хотя величина растягивающих напряжений там меньше в два раза.

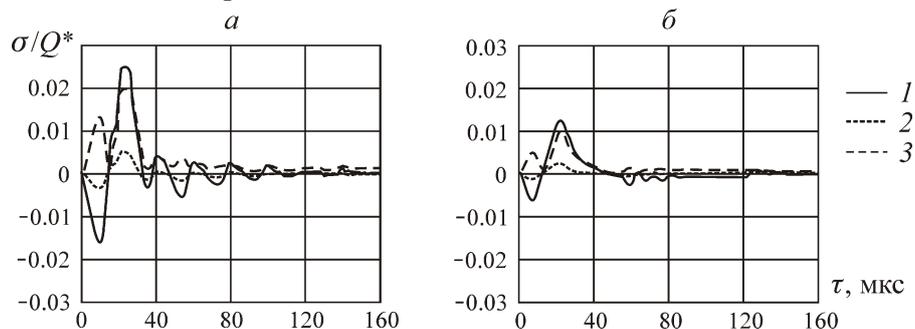


Рис. 2. Изменение безразмерных радиальных (1), окружных (2) напряжений и напряжения Мизеса (3) во времени τ на фронте взрывной волны на расстояниях от центра взрывного шпура: $a — 20r$; $b — 50r$

Из расчетов следует, что при скорости детонации ν , превышающей 4 км/с, величина растягивающих напряжений и их продолжительность на фронте волны достаточны для раскрытия природных и образования наведенных микротрещин, как можно заключить из работ [34, 35]. При скорости детонации, меньшей указанной величины, импульс растяжения становится незначительным. С учетом того, что инерционное время динамического разрушения многих материалов оценивается порядком 10 мкс, можно заключить, что при взрывном воздействии на угольный пласт с использованием детонационных ВВ в пачках нарушенного угля возможно раскрытие природных и образование новых микродефектов.

Моделирование равновесного состояния газонаполняемой трещины. Второе направление исследований связано с оценкой состояния образовавшихся трещин после прохождения взрывной волны. Трещину можно рассматривать как ключевой элемент наведенной волной структуры нарушенности угля. На берегах трещины метан из растворенного состояния переходит в свободное. Наполнение трещины свободным метаном и переход трещины из устойчивого равновесного состояния в неустойчивое является необходимым условием газодинамического разрушения угольного пласта в макромасштабе.

В этой работе рассматривается диффузионный механизм выхода сорбированного метана из угольного вещества в трещину. Его молекулы способны к относительно быстрому выходу из угольного вещества и составляют основную часть свободного метана, образующегося при выбросах угля и газа в подземных выработках.

Уравнение состояния свободного метана в трещине представим уравнением состояния идеального газа

$$p(t)V = n(t)RT, \quad (1)$$

где $n(t)$ — суммарное число молей растворенного метана, вышедшего в трещину за время t с момента образования трещины; $V = \pi l^2 h$ — объем дисковой трещины; p — давление; R — газовая постоянная.

Процесс диффузии описывается уравнением диффузии, представленным законом Фика в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \tilde{D} \nabla^2 c, \quad (2)$$

где ∇^2 — оператор Лапласа; \tilde{D} — коэффициент диффузии; c — концентрация растворенного в угле метана.

При этом на берегах трещины в стационарном равновесном состоянии должно выполняться соотношение Ленгмюра, играющее роль граничного условия для диффузионного переноса

$$\theta = \frac{abp}{1+bp}, \quad (3)$$

где a, b — сорбционные параметры для угля.

Уравнением, определяющим способность трещины к развитию, является соотношение Гриффитса – Ирвина, которое для дисковидной трещины можно упрощенно записать в виде

$$2p \left(\frac{l}{\pi} \right)^{1/2} = K_{IC}, \quad (4)$$

где K_{IC} — трещинностойкость материала.

Соотношения (1)–(4) определяют квазистационарное развитие трещин в зоне предразрушения угля. В целом, результаты моделирования соответствуют натурным данным. Действительно, выбросоопасные пласты при взрывном воздействии имеют разное время начала спровоцированного выброса — в одних случаях это время составляют секунды, а в других случаях — десятки минут, в третьих — выбросы вообще не происходят. Как следует из проведенных исследований, такое различие может быть объяснено локальной вариацией газоносности пласта, диффузионных параметров и трещинностойкости угля.

Развитие локализованной деформации в материале и его дальнейшее разрушение являются динамическими процессами, поэтому динамическое описание определено физической сутью протекающих процессов и позволяет анализировать их развитие во времени. Это особенно удобно для численного моделирования деформации горных пород, в которых неупругая дефор-

мация с самого начала развивается неоднородно, формируются зоны локализации деформации и образуются трещины. В связи с этим при решении задач деформирования геоматериалов важным вопросом является выбор метода описания процесса, позволяющего эффективно учитывать локализации деформаций и разрушение.

Учет изменения прочности может быть осуществлен при помощи функции накопления повреждений [36, 37]

$$D(\sigma_{ij}, t) = \int \frac{(S - S_0)^n}{(S^*)^n t^*} dt, \quad S > S_0, \quad (5)$$

где S — эффективное напряжение; S_0 , S^* , t^* , n — параметры, определяющие пороговое напряжение, после которого происходит накопление повреждений. При этом полагается, что ослабление, размягчение и расщепление геоматериала функционально задается изменением значений модуля объемного сжатия K , модуля сдвига μ и предела текучести Y от их базовых значений для неповрежденного материала K_0 , μ_0 , Y_0 , соответственно в зависимости от величины параметра поврежденности $D(\sigma_{ij}, t)$ (5)

$$K = (1 - D^2)K_0, \quad \mu = (1 - D^2)\mu_0, \quad Y = (1 - D^2)Y_0. \quad (6)$$

Параметр поврежденности D в целом характеризует степень разрушения материала и фактически определяет изменение его свойств, в частности, деформационную прочность, которая автоматически учитывается в используемой модели деформации метода сглаженных частиц. Поскольку значение D связано с изменением структуры материала, появлением микроповреждений, естественно предположить, что проницаемость материала также связана с этим значением соотношениями вида (6).

ВЫВОДЫ

Показано, что увеличение проницаемости угля при взрывном воздействии на угольный пласт может быть численно описано с использованием комбинированного подхода, связывающего газовыделение из угля с мерой нарушенности угольного пласта. На основании результатов компьютерного моделирования можно сделать вывод о том, что взрывное нагружение угольного пласта и дегазацию можно рассматривать как единый связанный процесс между повреждением угля и выделением газа. В связи с этим формирование взрывом зоны повреждения рассматривается как совместный вклад взрывной волны напряжения и квазистатического действия давления продуктов детонации. Исходя из этих предположений, при моделировании процесса разрушения было обнаружено, что давление продуктов детонации действует на породу, уже предварительно нагруженную и, возможно, нарушенную волной напряжения.

Теоретически обоснована возможность образования при взрывных воздействиях на угольный пласт областей предразрушения угля, наполняемых свободным метаном. Наведенные в этой области трещины в зависимости от физических и механических свойств угля могут быть либо устойчивыми, либо неустойчивыми (метастабильными) структурными образованиями. Метастабильная газосодержащая область предразрушения угля по прошествии некоторого времени может быть очагом выброса угля и газа в горную выработку. Время начала газодинамического разрушения угля после взрывного воздействия может варьировать от десятков секунд до часов и даже суток. Определяющими прогнозными параметрами выбросов, спровоцированных взрыванием угольного пласта, являются низкая трещиностойкость и высокая газоносность угля. Этим характеристикам отвечают пачки перемятого угля, которые в наибольшей степени опасны по выбросам угля и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Malyshev Yu. N., Trubetskoy K. N., and Airuni A. T.** Fundamentally applied methods of solving of the problem of coal seams methane, Moscow, Publishing House Ac. Mountain Sci., 2000, 519 pp. [**Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т.** Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов — М.: Изд-во Акад. горных наук, 2000. — 519 с.]
2. **Kurlenya M. V. and Serdyukov S. V.** Desorption and migration of methane in the thermodynamically unequal and spring coal massive, *Journal of Mining Science*, 2010, no. 1, pp. 61–68. [**Курленя М. В., Сердюков С. В.** Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.]
3. **Lunarzewski L. W.** Gas emission prediction and recovery in underground coal mines, *International Journal of Coal Geology*, 1993, vol. 35, pp. 117–45.
4. **Noack K.** Control of gas emissions in underground coal mines, *Int J Coal Geol*, 1998, vol. 35, pp. 57–82.
5. **Lu T. K., Yu H., Zhou T. Y., Mao J. S., and Guo B. H.** Improvement of methane drainage in high gassy coal seam using waterjet technique, *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 79, pp. 40–48.
6. **Diamond W. P., Garcia F.** Prediction of longwall methane emissions: an evaluation of the influence of mining practices on gas emissions and methane control systems, National institute for occupational safety and health, Pittsburgh. Report of Investigations, 1999, no. 9649.
7. **Saharan M. R. and Mitri H.** Destress blasting as a mines safety tool: some fundamental challenges for successful applications, *Procedia Engineering*, 2011, vol. 36, pp. 37–47.
8. **Konicek P., Saharan M. R., Mitri H.** Destress blasting in coal mining – state-of-the-art review, *Procedia Engineering*, 2011, vol. 26, pp. 179–94.
9. **Andrieux P. and Hadjigeorgiou J.** The destressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined destress blast in an underground mine pillar, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (3), pp. 407–421.
10. **Young G. B. C.** Computer modelling and simulation of coalbed methane resources, *International Journal of Coal Geology*, 1998, vol. 35, pp. 369–379.
11. **Odintsev V. and Shipovskii I.** Simulating Explosive Effect on Gas-Dynamic State of Outburst-Hazardous Coal Band, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55(4), pp. 556–566.
12. **Odintsev V. and Shipovskii I.** Numerical simulation of the stress-strain state of a coal seam caused by an explosion of a blast-hole charge with an annular gap, *EPJ Web of Conf.* 221 (2019), XXVI Conf. Num. Meth. Solv. Probl. Theory Elast. Plast. (EPPS-2019), Tomsk, Russia, 2019, V. Fomin and L. Placidi (Eds.), pp. 01053.
13. **Zhu W. C., Wei C. H., Li S., Wei J., and Zhang M. S.** Numerical modeling on destress blasting in coal seam for enhancing gas drainage, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, pp. 179–190.
14. **Zhu W. C., Liu J., Sheng J. C., and Elsworth D.** Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, vol. 44 (7), pp. 971–980.
15. **Connell L. D.** Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams, *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 79 (1–2), pp. 18–28.
16. **Karacan C. O. E., Diamond W. P., and Schatzel S. J.** Numerical analysis of the influence of in-seam horizontal methane drainage boreholes on longwall face emission rates, *International Journal of Coal Geology*, 2007, vol. 72, pp. 15–32.
17. **Set of rules** Instructions for the safe maintenance of mining work on the formation, dangerous on the sudden of the outburst of coal (breeds) and gas, Moscow, Gosgortekhnadzor of Russia, 2000, 160 pp. [**Инструкция** по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. — М.: Госгортехнадзор России, 2000. — 160 с.]

18. Mineev S., Yanzhula O., Hulai O., Minieiev O., and Zabolotnikova V. Application of shock blasting mode in mine roadway construction, *Journal of Mining of Mineral Deposits*, 2016, vol. 10 (2), pp. 91 – 96.
19. Fan X. G., Wang H. T., Yuan Z. G., and Xu H. X. The analysis on pre-splitting blasting to improve permeability draining rate in heading excavation. *Chongqing Daxue Xuebao, Journal of Chongqing University*, 2010, vol. 33(9), pp. 69 – 73.
20. Zhicheng Xie, Dongming Zhang, Zhenlong Song, Minghui Li, Chao Liu, and Dongling Sun. Optimization of drilling layouts based on controlled presplitting blasting through strata for gas drainage in coal roadway strips, *Energies*, 2017, vol. 10 (8), pp. 1 – 13.
21. Liu J. and Liu Z. G. Study on application of deep borehole pre-fracturing blasting technology to seam opening in mine shaft, *International Journal of Coal Science & Technology*, 2012, vol. 40 (2), pp. 19 – 24.
22. Jian Liu, Zegong Liu, and Kui Gao. An experimental study of deep borehole pre-cracking blasting for experimental study of deep borehole pre-cracking blasting for gas pre-drainage on a mine heading roadway in a low permeability seam, *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 225 – 232.
23. Chang W. B., Fan S. W., Zhang L., and Shu L. Y. A model based on explosive stress wave and tectonic coal zone, which gestate dangerous state of coal and gas outburst, *Journal of China Coal Society*, 2014, vol. 39 (11), pp. 2226 – 2231.
24. Baisheng Nie and Xiangchun Li. Mechanism research on coal and gas outburst during vibration blasting, *Journal of Safety Science*, 2012, vol. 50 (4), pp. 741 – 744.
25. Balashova T. A. Study of the influence of dynamic loads on the intensification of the desorption of methane and the outbrusting of the coal seam, Thesis of Cand. Tech. Sci., Kemerovo, Kuzbass State Technical University, 1998. [Балашова Т. А. Исследование влияния динамических нагрузок на интенсификацию десорбции метана и выбросоопасность пласта: дис... канд. техн. наук. — Кемерово, КузГТУ, 1998.]
26. Ettinger I. L. Methanoxulated coal seam as a solid methane-coal solution, *Journal of Mining Science*, 1990, no. 2, pp. 66 – 73. [Эттингер И. Л. Метанонасыщенный угольный пласт как твердый метанугольный раствор // ФТПРПИ. — 1990. — № 2. — С. 66 – 73.]
27. Alekseev A. D., Airuni A. T., Zverev I. V., Synolitsky V. V., and Vasyukkov Yu. F. Decancing of gas-coal solid solutions, *Journal of Mining Science*, 1994, no. 3. pp. 65 – 71. [Алексеев А. Д., Айруни А. Т., Зверев И. В., Синолицкий В. В., Васючков Ю. Ф. Распад газугольных твердых растворов // ФТПРПИ. — 1994. — № 3. — С. 65 – 71.]
28. Polevshikov G. Ya., and Kiryaeva T. A. Gazodynamic stability of the coal-methane, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2009, vol. 7. no. 12, pp. 146 – 149. [Полевшиков Г. Я., Киряева Т. А. Газодинамическая устойчивость углеметана // ГИАБ. — 2009. — Т. 7. — № 12. — С. 146 – 149.]
29. An F. H. and Cheng Y. P. An explanation of large-scale and gas outburst in underground coal mines: the effect of low-permeability zones on abnormally abundant gas, *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, vol. 14, pp. 2125 – 2132.
30. Shemyakin E. I., Kochanov A. N., and Maunda N. I. Parameters of wavelengths of stress and the pre-failure of rocks during the explosion, *Explosion Rock Failure and irreversible strans of rocks*, Moscow, Skochinsky Institute of Mining, 1997, pp. 10 – 17. [Шемякин Е. И., Кочанов А. Н., Деньгина Н. И. Параметры волн напряжений и предразрушение горных пород при взрыве. В сб. Разрушение взрывом и необратимые деформации горных пород. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1997. — С. 10 – 17.]
31. Aleksandrov V. E., Kochanov A. N., and Levin B. V. On the relationship of acoustic and strength properties of rocks in the zone of the pre-failure effect of the explosion, *Journal of Mining Science*, 1987, no. 4, pp. 45 – 48. [Александров В. Е., Кочанов А. Н., Левин Б. В. О взаимосвязи акустических и прочностных свойств пород в зоне предразрушающего действия взрыва // ФТПРПИ. — 1987. — № 4. — С. 45 – 48.]
32. Verma H. K., Samadhiya N. K., Singh M., and Prasad V. V. R. Blast induced damage to surrounding rock mass in an underground excavation, *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2014, vol. 2, pp. 13 – 18.

33. **Sher E. N. and Aleksandrova N. I.** Dynamics of microcracks in the elastic zone in the explosion of the sphere-charge in rock, *Journal of Mining Science*, 2001, no. 5, pp. 33–40. [**Шер Е. Н., Александрова Н. И.** Динамика микроразрушений в упругой зоне при взрыве сферического заряда в горной породе // ФТПРПИ. — 2001. — № 5. — С. 33–40.]
34. **Kochanov A. N. and Lestein V. N.** Wave pre-failure of monolithic rocks at the explosion, *Journal of Mining Science*, 2016, no. 6, pp. 38–48. [**Кочанов А. Н., Одинцев В. Н.** Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 38–48.]
35. **Macovei V. A. and Zubov V. I.** Dynamic fracture of structural materials, *Journal of Mechanical Engineering (Kyiv Polytechnic Institute)*, 2011, vol. 2, no. 61, pp. 141–146.
36. **Ahmadeev N. X.** Dynamic failure of solid bodies in the waves of stress, Ufa, BFAN USSR, 1988, 168 pp. [**Ахмадеев Н. Х.** Динамическое разрушение твердых тел в волнах напряжений. — Уфа: БФАН СССР, 1988. — 168 с.]
37. **Gridneva V. A., Korneev A. I., and Trushkov V. G.** Numerical calculation of the stress state and failure of the final thickness plate during the impact by various shapes indenter, *Journal of Russian Academy of Sciences, Mechanics of Solids*, 1977, no. 1, pp. 146–157. [**Гриднева В. А., Корнеев А. И., Трушков В. Г.** Численный расчет напряженного состояния и разрушения плиты конечной толщины при ударе бойками различной формы // Изв. АН СССР. МТТ. — 1977. — № 1. — С. 146–157.]