

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02:539.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

В. А. Трофимов, И. Е. Шиповский

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

Рассмотрен механизм взрывного разрушения угля для определения возможностей оптимизации динамического воздействия на угольный пласт, способствующего совершенствованию паспортов буровзрывных работ. Использована комбинированная модель газонасыщенного угля для описания связи 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 динамическое воздействие.

Взрывные работы, динамическое воздействие, метанонасыщенный пласт, предразрушение, компьютерное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20200509

При подземной разработке угольных пластов возникает проблема дисбаланса природной угольно-метановой системы [1, 2]. Во время антропогенного воздействия на угольный пласт может выделяться большое количество метана, что приводит к его взрыву или выбросу угля и газа [3]. В остальных случаях метановыделение слабое, что усложняет извлечение метана из пласта. Динамическое воздействие — инструмент управления состоянием угольных пластов [4–11]. В результате взрывного нагружения в пласте могут образовываться протяженные трещины, способствующие дегазации пласта [12].

Предотвращение проблем угольной промышленности, вызванных выбросами угля и газа при подземной добыче, требует интенсивных дорогостоящих исследований, инженерных разработок и выбора наиболее подходящих режимов вентиляции и дегазации [13]. Востребован поиск эффективных решений для прогнозирования и практического снижения опасности выброса угля и газа [14]. Высокое содержание газа в угле влияет на извлечение метана из угольных пластов, но из-за низкой проницаемости пластов не гарантирует высокий выход газа [15]. Чтобы увеличить проницаемость угольного пласта и улучшить выход газа, проводится гидро-

разрыв пласта, гидроабразивная обработка и динамическое воздействие [16]. Сотрясательное взрывание влияет на трещины в угле, которые развиваются вследствие изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород [17, 18].

При сотрясающих взрывах импульс давления продуктов детонации заряда взрывчатого вещества приводит к двум типам нагружения стенок скважины: воздействию взрывной волны напряжения и более продолжительному действию давления продуктов детонации. Волна напряжений создает зоны разрушения и инициирует развитие окружающих радиальных трещин, а давление продуктов детонации способствует разрушению и расширению трещин. Регулирование образования трещин вокруг скважины при взрывных работах может осуществляется путем контроля формы волны взрывного напряжения [19, 20]. Для оценки газовыделения при сотрясающем взрывании в поврежденном угольном пласте и прогнозирования характера последующей дегазации пласта возникающее движение газа совместно с наведенными взрывом деформациями

и разрушением угля следует рассматривать как единый взаимосвязанный процесс.

В [20–26] исследуется численное моделирование взрывного разрушения и расчет выделения газа в угольном пласте. В вычислительной практике разработаны методы для моделирования разгрузки пласта и учета выделения газа при подземной разработке, предполагающие эффективный инструмент для повышения точности и качества контроля газа, выбора технологий дегазации и вентиляции. Суть механизма дегазации нагруженного и разрушенного угольного пласта не изучена для единого процесса “нагружение – разрушение – выделение газа” в угольной выработке.

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.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для численного описания деформации с учетом разрушения наряду с формулировкой условий разрушения необходима организация специального расчета напряженно-деформированного состояния геоматериала в разрушенной области. В качестве условия разрушения в настоящей работе применяется критерий, основанный на принципе накопления повреждений среды [27–29]. Объемные изменения, связанные с образованием микротрещин, учитываются без перехода на макроуровень и без характеристики трещин, что оправданно при множественном разрушении без формирования магистральных трещин. Это эффективно при описании деформирования горных пород в условиях сжатия и сдвига.

Развитие локализованной деформации в геосреде и ее разрушение — динамические процессы. Динамическое описание помогает анализировать их развитие во времени, что удобно для численного моделирования деформации горных пород, в которых неупругая деформация развивается неоднородно, формируются зоны локализации деформации и образуются трещины. При решении задач деформирования геоматериалов необходимо выбрать метод характеристики процесса, позволяющий эффективно учитывать локализации деформаций и разрушение.

Для моделирования динамических задач геомеханики используется подход механики сплошной среды [30, 31]. Численно решается основная система дифференциальных уравнений, включающая уравнения неразрывности, сохранения импульса и энергии:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{U} = 0; \quad \rho \frac{dU_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i; \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} + \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

где ρ — плотность геосреды; \vec{U} — вектор скорости; $U_i = dx_i / dt$ — компоненты вектора скорости; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; F_i — массовые силы; E — удельная внутренняя энергия; $\varepsilon_{ij} = 1/2 \cdot (x_{i,j} + x_{j,i})$ — компоненты тензора деформаций; q — заданный приток энергии в систему.

Замыкают систему уравнений (1) определяющие модель среды соотношения, устанавливающие связи между тензорами напряжений и деформаций. Для описания деформации горных пород в условиях сжатия и сдвига с возможным превышением предела упругости следует использовать упругопластическую модель. Скорость деформации можно представить в виде упругой и пластической частей:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (2)$$

Напряженное состояние упругой среды определяется законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda (\dot{\theta} - \dot{\theta}^p) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p), \quad (3)$$

здесь λ и μ — коэффициенты Ламе; δ_{ij} — символ Кронекера.

Для проведения расчетов необходимо записать соотношения для шаровой и девиаторной частей тензора напряжений: $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$, где $P = -\sigma_{kk} / 3$ — давление; S_{ij} — компоненты девиатора тензора напряжений. В упругой области используется гипотеза Гука, связывающий скорости изменения напряжений и деформации в виде

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^e - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

где $\frac{DS_{ij}}{Dt} = \dot{S}_{ij} - S_{ik} \dot{\omega}_{jk} - S_{jk} \dot{\omega}_{ik}$ — производная Яуманна.

Уравнение состояния:

$$\dot{P} = -K \frac{\rho}{\dot{\rho}}. \quad (5)$$

K, μ — модуль сжатия и модуль сдвига. Компоненты тензора скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и тензора скоростей вращения $\dot{\omega}_{jk}$ определяются из соотношений

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} + U_{j,i}), \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} - U_{j,i}). \quad (6)$$

Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния [32–35], при достижении которого начинается неупругое, пластическое деформирование или разрушение:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0. \quad (7)$$

Согласно теории течения, пластическая деформация рассчитывается из уравнения

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (8)$$

где $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$ — пластический потенциал; $d\lambda$ определяется в ходе деформирования из условия пластичности; ε_{ij}^p — компоненты тензора пластической деформации.

Предельную поверхность можно представить в координатах инвариантов тензора напряжений: по оси абсцисс первый инвариант — давление, по оси ординат второй инвариант — интенсивность напряжений сдвига (рис. 1).

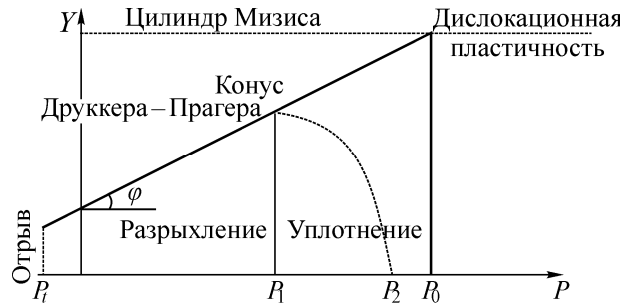


Рис. 1. Поверхность предельного состояния горной породы

Из рис. 1 видно, что с ростом давления уровень интенсивности касательных напряжений увеличивается согласно заданному предельному состоянию: прочность геоматериала повышается до некоторого уровня давления P_1 , а затем снижается из-за начала разрушения зерен среды. Для более плотных пород прочность возрастает до предела, при котором проскальзывание по границам зерен становится невозможным, и осуществляется переход к пластическому деформированию, подчиняющемуся условию текучести Мизеса.

Предельная поверхность на рис. 1 в области сдвиговой деформации при $P_t \leq P \leq P_0$ описывается уравнением

$$f_1(P, Y) = Y - \alpha P - \gamma, \tag{9}$$

а при давлениях $P > P_0$ — уравнением

$$f_2(P, Y) = \frac{(P - P_0)^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} - 1 = 0. \tag{10}$$

Здесь $Y = (S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ — интенсивность касательных напряжений; P_t — давление, при котором происходит хрупкое разрушение путем отрыва; P_0 — пороговое давление, при котором начинается уплотнение геосреды, $a = P_1 - P_0$, $b = c + \alpha P_0$. Параметры α и γ , описывающие поверхность Друккера–Прагера, выражаются через угол внутреннего трения φ и сцепление c модели Кулона–Мора:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}, \quad \gamma = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}. \tag{11}$$

Поверхность напряженного состояния может меняться при деформировании. Параметры, описывающие поведение геосреды за пределом упругости, — функции от накопленной пластической деформации и давления. При деформировании упрочняются и накапливаются повреждения. Учет изменения прочности можно осуществить при помощи функции меры накопления повреждений [27, 28]:

$$D(\sigma_{ij}, t) = \int \frac{(S - S_0)^n}{(S^*)^n t^*} dt, \quad S > S_0, \quad (12)$$

где S — эффективное напряжение; S_0, S^*, t^*, n определяют пороговое напряжение, после которого происходит накопление повреждений. Полагается, что ослабление, размягчение и расщепление геоматериала функционально задаются изменением модуля объемного сжатия K , модуля сдвига μ и предела текучести Y от их базовых значений для неповрежденного материала K_0, μ_0, Y_0 в зависимости от $D(\sigma_{ij}, t)$ (12):

$$K = (1 - D^2)K_0, \quad \mu = (1 - D^2)\mu_0, \quad Y = (1 - D^2)Y_0. \quad (13)$$

Применение этих соотношений позволяет рассматривать задачи о развитии деформации и разрушения за счет деградации прочности с течением времени. При высоком давлении, когда раскрытие трещин и проскальзывание по их поверхностям невозможны, происходит переход к пластическому деформированию в недрах при больших глубинах. Предельная поверхность переходит в цилиндр Мизеса (рис. 1).

Для замкнутой системы уравнений (1)–(13) ставится краевая задача путем постановки начальных и граничных условий. Для демонстрации вычислительных возможностей выбранного численного метода приведено решение модельной задачи о взрыве удлиненного заряда в скважине вблизи дневной поверхности (рис. 2). Задача может использоваться при анализе деформации и разрушения массива и свободной поверхности при взрывной прокладке траншей.

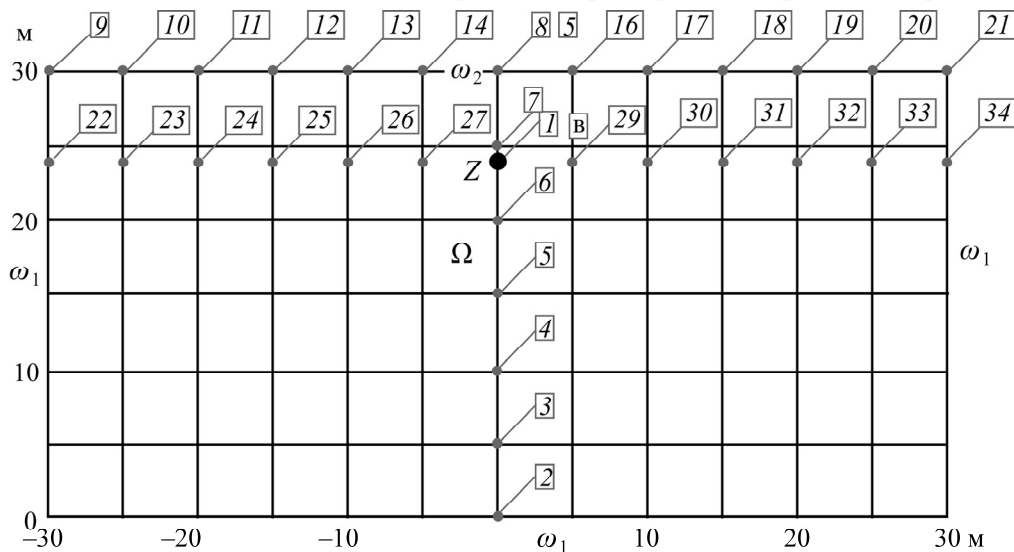


Рис. 2. Начальная конфигурация расчетной области в задаче о подрыве заглубленного заряда Z

Граничные условия задаются на поверхностях ω_1, ω_2 расчетной области, где на ω_1 реализуются условия полного поглощения, возникающих при взрыве волн нагрузки, а символом ω_2 обозначены свободные поверхности (дневная поверхность и стенки скважины). Внутри области Ω в начальный момент задавались $\rho^0 = 1440 \text{ кг/м}^3; \sigma_{ij}^0 = 0; \vec{U}^0 = 0; \dot{U}_y = 9.81 \text{ м/с}^2$. На глубине 6 м от дневной поверхности в скважине диаметром 0.2 м размещен заряд Z взрывчатого вещества (ВВ) ANFO ($\rho^0 = 931 \text{ кг/м}^3; D = 4160 \text{ м/с}$, теплота взрыва 3190 кДж/кг) с местом расположения детонатора в центре заряда.

Цифры в рамках указывают места и номера точек, в которых регистрируются изменения параметров угольного пласта (смещения, скорости, мера накопления повреждений D и т. д.). Для решения поставленной краевой задачи выбран метод сглаженных частиц, который зарекомендовал себя в решении задач геомеханики [36–40].

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделируется физический процесс взрывного разрушения угольного пласта. Исследуется действие механизма взрывного разрушения, в котором энергия заряда ВВ в форме потенциальной химической энергии проявляется при детонации как кинетическая энергия во взрывной волне сжатия и как энергия в расширяющихся продуктах детонации взрывчатого вещества (рис. 3).

Взрывная волна сжатия и давление продуктов детонации приводят к фрагментации монолитной породы при ее разрушении и эволюции образования трещин в зависимости от этапов нагружения (рис. 4). При численном расчете программный комплекс автоматически сохраняет в заданные моменты времени параметры породы в виде графических файлов при взрывном нагружении и разрушении массива горной породы. Серым цветом обозначено упругое состояние, темно-серым — пластическое, черным — места, где выполнилось условие разрушения $P < P_t$.

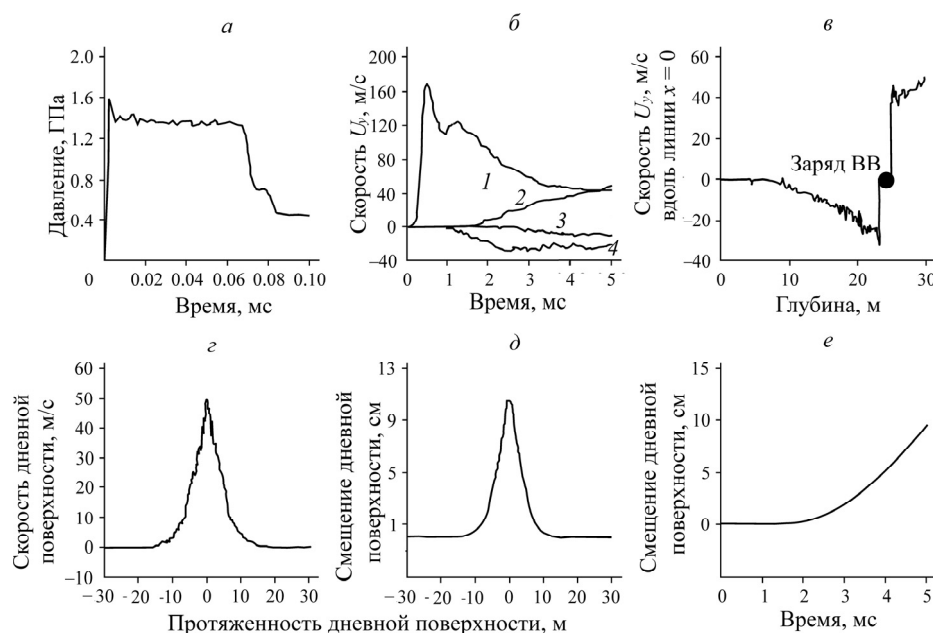


Рис. 3. Действие импульса давления, создаваемого продуктами детонации скважинного заряда ВВ: *a* — давление в центре скважины; *b* — скорость на расстоянии: 1 — 1 м над зарядом (в точке 7), 2 — 2 м над зарядом (в точке 8), 3 — 9 м ниже центра скважины (в точке 5), 4 — 4 м ниже центра скважины (в точке 6); *в* — изменение вертикальной скорости в момент времени 5 мс вдоль вертикальной линии, проведенной через центр заряда; *г* — вертикальная скорость дневной поверхности в момент времени 5 мс; *д* — смещение дневной поверхности в момент времени 5 мс; *е* — смещение дневной поверхности в точке над расположением заряда при взрывном нагружении

Развитие напряженно-деформированного состояния во времени и механизм образования радиальных трещин вокруг заряда — общая форма реакции геосреды на импульсную нагрузку. Скорость детонации взрывчатых веществ выше скорости деформирования породы. Поверхность геосреды воспринимает действие взрыва одновременно по всей площади контакта заряда с угольным пластом.

На границе раздела “заряд–геосреда” детонационная волна превращается во взрывную волну сжатия с высокой амплитудой, которая вызывает дробление горной породы в условиях всестороннего неравномерного сжатия под действием естественного горного давления (0.3–1.2 мс). По мере удаления от заряда амплитуда волны резко уменьшается (рис. 4б, з) и на расстоянии 5–6 радиусов заряда превращается в волну упругого напряжения, скорость ее распространения меньше скорости ударной волны и равна скорости звука в породе.

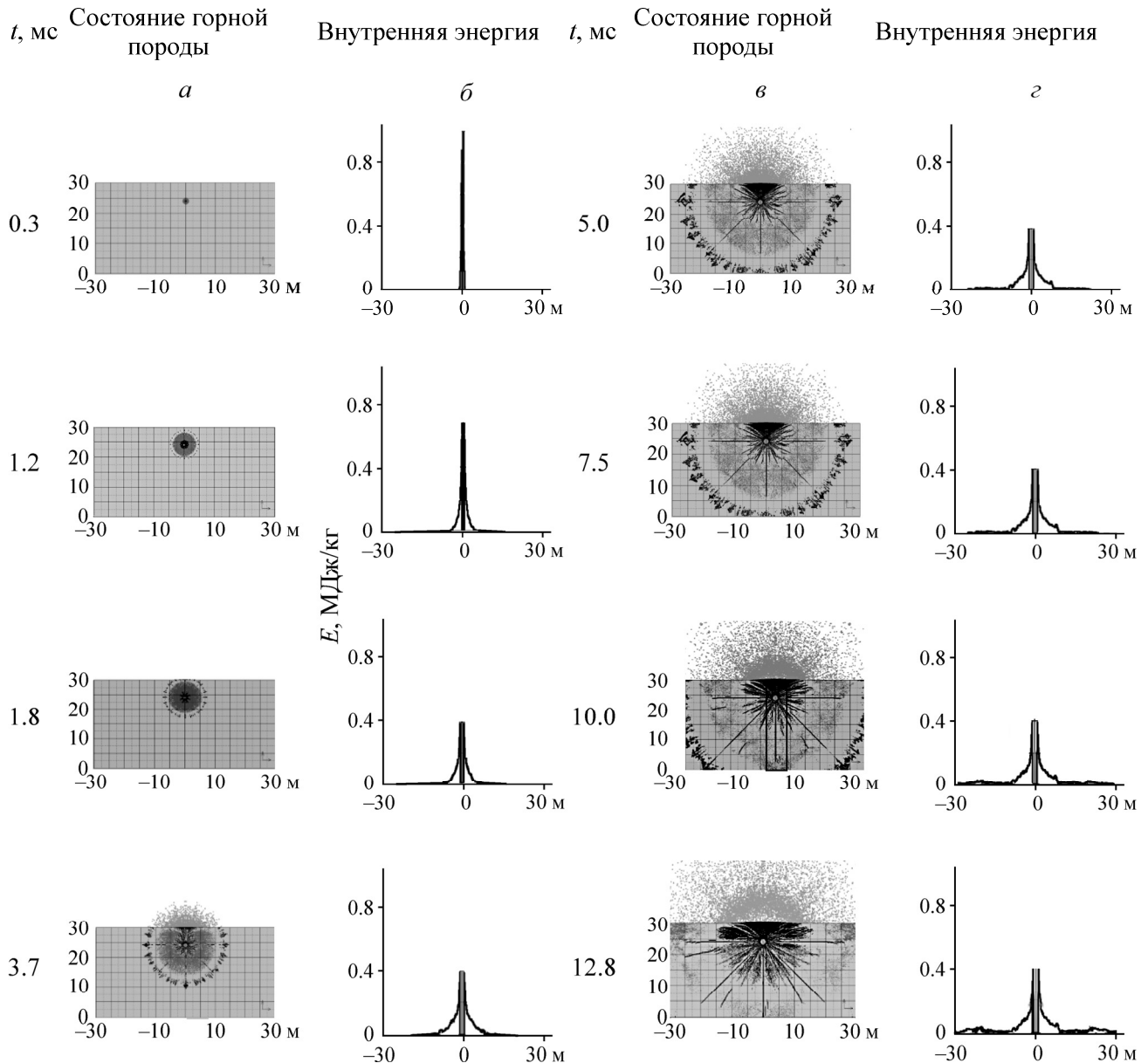


Рис. 4. Последовательность рассчитанных состояний породы (а, в) на указанные моменты времени и распределение кинетической энергии массива (б, г) вдоль горизонтальной линии на уровне размещения заряда

Амплитуда взрывной волны остается выше, чем прочность на раздавливание угля, и после ее прохождения наблюдается интенсивное разрушение угля с потерей его первоначальной структуры (0.3–5.0 мс). Эта область характеризуется как зона измельчения или пластического действия взрыва и ограничена 10–12 радиусами заряда (3.7–10.0 мс). После прохождения

взрывной волны разрушающее воздействие также оказывают взрывные газы под высоким давлением. При достижении 2 мс продукты детонации взрывчатых веществ просачиваются через породу, разрыхленную взрывом, и достигают дневной поверхности.

При действии взрывной волны и взрывных газов уголь вблизи заряда быстро сжимается и смещается за фронтом волны напряжения. Из-за этого формируется зона сильно деформирующейся геосреды с системой многочисленных пересекающихся трещин (5.0–12.8 мс). По мере удаления от заряда напряжение в угле от взрыва уменьшается и на определенном расстоянии становится меньше сопротивления раздавливанию, в результате изменяется характер деформации и разрушения (5.0–12.8 мс).

Под действием прямой волны напряжений и сжатых взрывных газов, распространяющихся из зоны заряда, сжимающие напряжения возникают в угле в радиальном направлении, а растягивающие — в тангенциальном, что вызывает появление радиальных трещин (5.0–12.8 мс). Уголь деформируется под высоким давлением, и радиусы условных зон, распределенных вокруг заряда с различным типом повреждений, увеличиваются. Уголь в радиальных направлениях испытывает растягивающие напряжения, которые обеспечивают развитие в угольном пласте вокруг заряда радиальных трещин (7.8–12.8 мс).

При дальнейшем удалении волны деформации от заряда растягивающие тангенциальные напряжения уменьшаются и становятся меньше предела прочности породы. За пределами этого расстояния не произойдет разрушение и возникнут сейсмические колебания. Когда давление газа в центре взрыва снизится, сжатый уголь разгрузится и сместится к центру заряда, вследствие чего уменьшится условный радиус сферы воздействия, а участки угля, прилегающие к полости, испытают растягивающие напряжения в радиальных направлениях. В результате появляется ряд кольцевых тангенциальных трещин.

Ко времени ~5.0 мс напряжения над зарядом ослабевают: дневная поверхность набухает и сдвигается без образования воронки выброса. Через ~12.0 мс уголь, разрушенный над зарядом, формирует воронку, заполненную разрыхленным углем, через которую происходит интенсивная фильтрация газообразных продуктов взрыва. Форма воронки взрыва заглубленного заряда вблизи дневной поверхности близка к прямому конусу с вершиной в центре заряда, что соответствует полевым наблюдениям.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН ПРОНИЦАЕМОСТИ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Исследован взрыв заряда в шпуре, пробуренном в цилиндрическом образце радиусом 3.0 м. Заряд ВВ ANFO размещается в скважине диаметром 0.04 м. На рис. 5 показана серия последовательных конфигураций зон разрушения на указанные моменты времени. В угле формируется система локализованных зон предразрушения, которые становятся трещинами отрыва.

Помимо радиальных зон, связанных с растяжением под действием продуктов взрыва на стенки скважины, образуются концентрические зоны, разрушающие уголь на отдельные фрагменты. Ввиду отсутствия свободной поверхности наблюдается определенная симметрия деформирования и разрушения. На поздних этапах происходит разделение образца на отдельные фрагменты, форма и количество которых совпадают с экспериментальными данными [40, 41].

Для удлиненного угольного пласта, в котором расположен шпур с зарядом, на рис. 6 показано распределение меры накопления повреждений D в момент 3.08 мс. На границе расчетной области поставлены условия отсутствия отражения генерируемых волн, что позволило увеличить расчетное время для деформирования и разрушения. D характеризует степень разрушения

материала и определяет изменение прочности геосреды, которая автоматически учитывается в используемой деформационной модели метода сглаженных частиц.

Поскольку D связано с изменением структуры материала и появлением микрповреждений, то проницаемость материала также соотносится с ней уравнениями вида (13). На рис. 7 показано распределение D в более поздний момент времени с развитой поврежденностью.

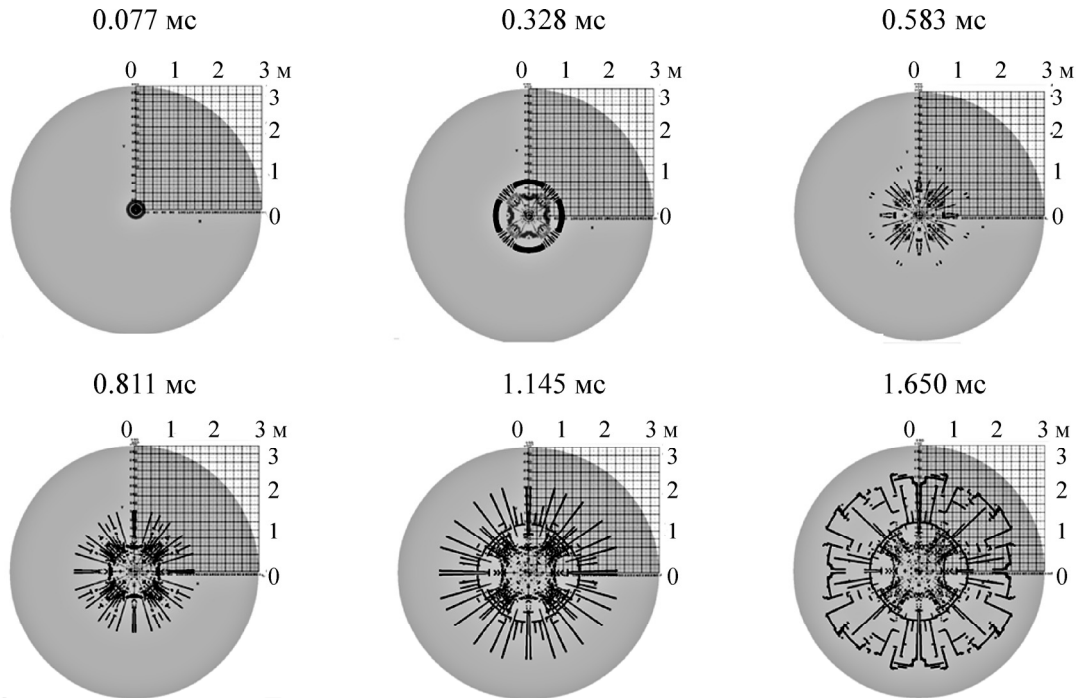


Рис. 5. Последовательность расчетных зон предразрушения вокруг шпура при взрыве заряда взрывчатого вещества ANFO в цилиндрическом образце

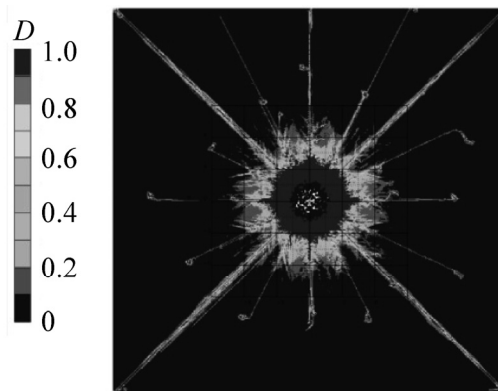


Рис. 6. Конфигурация распределения зон разрушения различной интенсивности, $t=3.08$ ms

На рис. 7 черный цвет обозначает наибольшее разрушение, для которого $D=1$: это образовавшиеся трещины. Числа в рамках указывают характерные точки, в которых записаны изменяющиеся во времени параметры деформации, включая разрушение.

Изменение меры накопления повреждений в некоторых точках показано на рис. 8. Точки 5, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 19, 20 попадают в зоны полного разрушения, и D

становится равным 1, а точки 7, 12, 13 — в серую зону, где D меньше 1. Видно неоднородное распределение индуцированной проницаемости вблизи шпура. Газовыделение связано с нарушением газоносного угольного пласта в зависимости от меры накопления повреждений D .

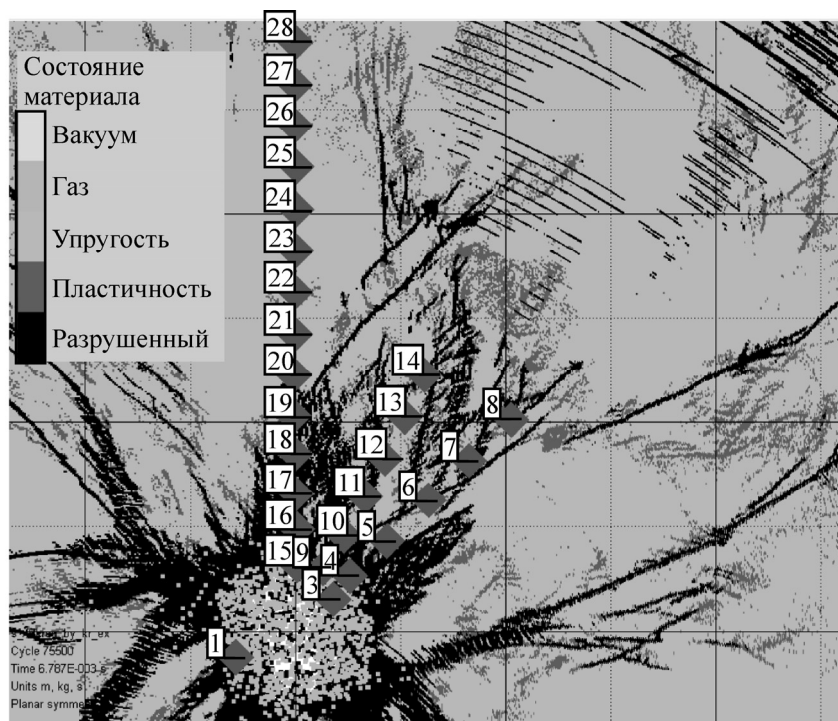


Рис. 7. Увеличенный фрагмент рассчитанной картины распределения зон разрушения разной интенсивности в $t = 6.787$ мс

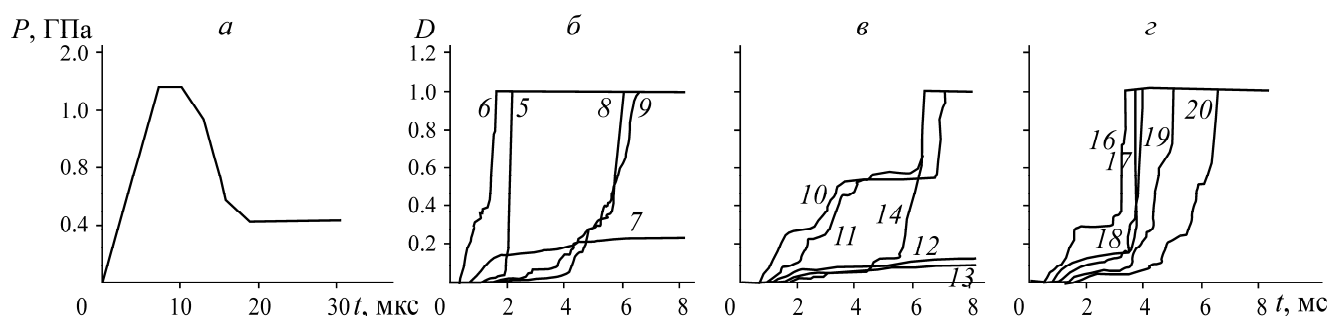


Рис. 8. Импульс давления продуктов детонации заряда ВВ (а) и наведенное им изменение меры накопления повреждений D в указанных контрольных точках: б — в точках 5–9; в — 10–14; г — 16–20

ВЫВОДЫ

Для изучения мер по увеличению степени проницаемости угля и повышению эффективности дегазации угольного пласта используется комбинированный подход для численного моделирования сотрясающего взрыва, связывающий газовыделение с мерой нарушения угольного пласта. Взрывное нагружение угольного пласта и дегазацию можно рассматривать как взаимодействие между повреждением угля и выделением газа. Формирование взрывом зоны повреждения характеризуется как совместный вклад взрывной волны напряжения и квази-

статического действия давления продуктов детонации. При моделировании разрушения обнаружено, что давление продуктов детонации действует на породу, уже предварительно нагруженную волной напряжения. Численная модель может качественно описать развитие зон разрушения вокруг скважины при взрывных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мальшев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т.** Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: АГН, 2000. — 519 с.
2. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.
4. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. — М.: Госгортехнадзор России, 2000. — 160 с.
5. **Mineev S., Yanzhula O., Hulai O., Miniciev O., and Zabolotnikova V.** Application of shock blasting mode in mine roadway construction, *Min. Miner. Deposits*, 2016, Vol. 10 (2). — P. 91–96.
6. **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, J. Chongqing University*, 2010, Vol. 33(9). — P. 69–73.
7. **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). — P. 1–13.
8. **Liu J. and Liu Z. G.** Study on application of deep borehole pre-fracturing blasting technology to seam opening in mine shaft, *Coal Sci. Technol.*, 2012, Vol. 40 (2). — P. 19–24.
9. **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 J. Min. Geo-eng.*, 2012, Vol. 36, No. 3. — P. 225–232.
10. **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, *J. China Coal Soc.*, 2014, Vol. 39(11). — P. 2226–2231.
11. **Baisheng Nie and Xiangchun Li.** Mechanism research on coal and gas outburst during vibration blasting, *Safety Sci.*, 2012, Vol. 50 (4). — P. 741–744.
12. **Балашова Т. А.** Исследование влияния динамических нагрузок на интенсификацию десорбции метана и выбросоопасность пласта: дис... канд. техн. наук. — Кемерово: Кузбасс. гос. техн. ун-т, 1998.
13. **Lunarzewski L. W.** Gas emission prediction and recovery in underground coal mines, *Int. J. Coal Geol.*, 1993, Vol. 35. — P. 117–45.
14. **Noack K.** Control of gas emissions in underground coal mines, *Int. J. Coal Geol.*, 1998, Vol. 35. — P. 57–82.
15. **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, *Int. J. Coal Geol.*, 2009, Vol. 79. — P. 40–48.
16. **Diamond W. P. and 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.
17. **Saharan M. R. and Mitri H.** Destress blasting as a mines safety tool: some fundamental challenges for successful applications, *Proc. Eng.*, 2011, Vol. 36. — P. 37–47.

18. **Konicek P., Saharan M. R., and Mitri H.** Destress blasting in coal mining — state-of-the-art review, *Proc. Eng.*, 2011, Vol. 26. — P. 179–94.
19. **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, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2008, Vol. 45 (3). — P. 407–421.
20. **Young G. B. C.** Computer modelling and simulation of coalbed methane resources, *Int. J. Coal Geol.*, 1998, Vol. 35. — P. 369–379.
21. **Odintsev V. and Shipovskii I.** Simulating explosive effect on gas-dynamic state of outburst-hazardous coal band, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55(4). — P. 556–566.
22. **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 Conferences 221 (2019) XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity*, Tomsk, Russia, 2019, V. Fomin and L. Placidi (Eds.), 01053. — 6 p.
23. **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, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2013. — P. 179–190.
24. **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, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 44 (7). — P. 971–980.
25. **Connell L. D.** Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams, *Int. J. Coal Geol.*, 2009, Vol. 79 (1–2). — P. 18–28.
26. **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, *Int. J. Coal Geol.*, 2007, Vol. 72. — P. 15–32.
27. **Ахмадеев Н. Х.** Динамическое разрушение твердых тел в волнах напряжений. — Уфа: БФАН СССР, 1988. — 168 с.
28. **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.
29. **Макаров П. В., Смолин И. Ю., Стефанов Ю. П., Кузнецов П. В., Трубицын А. А., Трубицына Н. В., Ворошилов С. П., Ворошилов Я. С.** Нелинейная механика геоматериалов и геосред. — Новосибирск: Гео, 2007. — 240 с.
30. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1976. — Т. 1. — 536 с.; Т. 2. — 584 с.
31. **Wilkins M. L.** Computer simulation of dynamic phenomena, Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 1999. — 246 p.
32. **Drucker D. C. and Prager W.** Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, Vol. 10, No 2. — P. 157–165.
33. **Николаевский В. Н.** Механика пористых и трещиноватых сред. — М.: Недра, 1984. — 232 с.
34. **Стефанов Ю. П.** Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // *Физ. мезомех.* — 2002. — Т. 5. — № 5. — С. 107–118.
35. **Стефанов Ю. П., Бакеев Р. А., Ельцов И. Н., Ахтямова А. И.** Численное исследование формирования зон дилатансии и компакции вокруг скважин // *Изв. вузов. Физика.* — 2013. — Т. 56. — № 7/3. — С. 101–104.

36. **Shipovskii I. E.** Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code, Scientific Bulletin of National Min. University, 2015, Iss. 1 (145). — P. 76–82. [In Russian]
37. **Zakharov V. N., Trofimov V. A. Shipovskii I. E., and Malinnikova O. N.** Modeling the influence of pulp masses in dump massive on the dynamics of landslide zones development, Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU), Earth sciences, 2020, Vol. 1. — P. 359–375. [In Russian]
38. **Trofimov V. A., Shipovskii I. E., Malinnikova O. N., and Wen-Jie Xu.** Numerical approach to computer simulation of landslid events, AIP Conf. Proc. of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures, Tomsk, Russia, 2019. — P. 020329-1-020329-8.
39. **Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е.** Метод сглаженных частиц в моделировании разрушения и обрушения кровли выработки // ГИАБ (Спец. выпуск 49. “Подземная угледобыча XXI век”). — 2018. — № 11. — Т. 2. — С. 464–475.
40. **Ефремовцев Н. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е.** Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда // ГИАБ. — 2020. — № 6. — С. 73–85.
41. **Trofimov V. A. and Shipovskii I. E.** Simulation fragmentation of samples of rock at explosive loading, E3S Web of Conferences Volume 192 (2020) VIII Int. Sci. Conference “Problems of Complex Development of Georesources”, Khabarovsk, Russian Federation, 2020, I. Rasskazov and S. Tkach (Eds.), 2020, 01013. — 7 p.

Поступила в редакцию 03/VIII 2020

После доработки 27/VIII 2020

Принята к публикации 11/IX 2020