

Методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород

С. С. Кубрин¹, И. Е. Шиповский^{1✉}

¹ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

✉ iv_ev@mail.ru

Резюме. Предложена методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород, ориентированная на описание не только достижения предельного состояния, но и последующей пространственно-временной кинетики локализации, фрагментации и переноса разрушенной массы. Методологический каркас включает внутреннюю переменную стадии переходного разрушения F , обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение Ψ , критическое значение параметра воздействия Ψ_c , нормированный параметр воздействия Ψ/Ψ_c , закон роста активной зоны и механизмы истощения энергетического или структурного ресурса. Показано, что физическое содержание параметра воздействия задается раздельно для газомеханических, гравитационно-сдвиговых и взрывных процессов, тогда как общей остается структура «параметр воздействия – критическое значение – рост – истощение». Для численной реализации рассмотрен модифицированный метод сглаженных частиц, позволяющий сопровождать большие деформации, образование свободных поверхностей и фрагментацию без априорного задания геометрии разрушения. Сформулирована связь переменной F с деградацией жесткости, прочности и проницаемости; показана необходимость контроля условия Куранта, длины сглаживания, искусственной вязкости, контактных параметров и энергетического баланса. Отдельно рассмотрено сопряжение геомеханической модели с газовым балансом выемочного участка и сквозным расчетом взрывного воздействия. Методология предназначена для сценарной оценки выбросоопасности, устойчивости массива и последствий динамического воздействия при разработке твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: геомеханика, массив горных пород, переходное разрушение, цифровое моделирование, внутренняя переменная, активная зона, метод сглаженных частиц, газоразделение, метаноперенос, взрывное воздействие

Для цитирования: Кубрин С.С., Шиповский И.Е. Методология цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива горных пород. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 80-85. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-80-85>.

Methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes

S. S. Kubrin¹, I. E. Shipovskii^{1✉}

¹Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation

✉ iv_ev@mail.ru

Abstract. A methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes is proposed. It is intended to describe not only attainment of a limit state, but also the subsequent spatiotemporal kinetics of localization, fragmentation, and transport of failed material. The methodological framework includes the internal variable F characterizing the stage of transient failure, the generalized parameter Ψ of the failure-inducing action, the critical action parameter Ψ_c , the normalized action parameter Ψ/Ψ_c , an active-zone growth law, and mechanisms accounting for depletion of the available energy or structural resource. The physical meaning of the action parameter is specified separately for gas-mechanical, gravity-shear, and blasting processes, whereas the common structure remains “action parameter - critical value - growth - depletion”. A modified smoothed particle hydrodynamics method is considered for numerical implementation. It enables large deformations, free-surface formation, and fragmentation to be traced without prescribing the failure geometry a priori. The relation of F to degradation of stiffness, strength, and permeability is formulated. The need to control the Courant condition, smoothing length, artificial viscosity, contact parameters, and energy balance is demonstrated. Coupling of the

geomechanical model with the gas balance of a mining panel and with a through calculation of blasting is considered separately. The methodology is intended for scenario-based assessment of coal-and-gas outburst hazard, rock mass stability, and consequences of dynamic action in solid mineral extraction.

Keywords: geomechanics, rock mass, transient failure, digital modeling, internal variable, active zone, smoothed particle hydrodynamics, gas release, methane transport, blasting action

For citation: Kubrin S.S., Shipovskii I.E. Methodology for digital modeling of transient rock mass failure processes. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 80-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-80-85>.

Введение

Современная инженерия массивов горных пород развивается в направлении совместного применения многофизического эксперимента, численного моделирования и цифровой обработки данных. Для глубоких и структурно неоднородных массивов традиционные эмпирические и квазистатические схемы все чаще дополняются моделями, учитывающими динамическое нагружение, трещиноватость, слоистость, водо- и газонасыщенность, а также эволюцию микроповреждений до формирования макроскопической зоны разрушения [1–6]. В задачах горного производства это относится к локальным обрушениям, потере устойчивости бортов и откосов, разрушению приконтурных зон выработок, внезапным выбросам угля и газа и технологическому взрывному воздействию [7].

Особую сложность представляют быстропротекающие процессы, для которых достижение критерия прочности является только начальной стадией события. После локальной активации происходит перераспределение напряжений, деградация свойств, образование новых свободных поверхностей, изменение фильтрационно-емкостных характеристик и перенос разрушенного материала. Для газоносных угольных пластов многофакторная природа выброса, включающая напряженное состояние, прочность угля, газовое давление, десорбцию, фильтрацию и пространственную неоднородность, подтверждена классическими и современными исследованиями [8–14]. Поэтому расчетная модель, фиксирующая только факт превышения предельного состояния, не дает достаточного основания для оценки сценария последующего развития опасного процесса.

Цель работы: обосновать методологию цифрового моделирования переходных процессов разрушения массива, объединяющую энергетико-кинетическую постановку, вычислительное описание больших деформаций и фрагментации, а также сопряжение механического состояния с газовым и взрывным воздействием. Научная новизна состоит в переносе центра анализа с момента достижения критерия на расчетную эволюцию активной зоны, определяемую обобщенным параметром воздействия, вызывающего разрушение, его критическим значением, обратными связями и доступным энергетическим ресурсом.

Методический дефицит существующих расчетных схем

В инженерной геомеханике применяются критерии прочности, поверхности текучести, коэффициенты устойчивости и показатели запаса. Они необходимы для оценки допустимости напряженно-деформированного состояния, но сами по себе не описывают посткритическую кинетику. При динамическом и сдвиговом нагружении макроскопическое разрушение формируется в результате зарождения, роста и коалесценции локальных дефектов; его траектория зависит от структуры массива, формы выработки, ориентации трещин и режима нагружения [2–6]. Следовательно, расчет должен от-

вечать не только на вопрос о достижении предела прочности, но и на вопросы о месте зарождения активной зоны, скорости ее роста, возможности затухания и переходе к связанной макроскопической области локализованного разрушения.

В газоносном угольном пласте механическое раскрытие дефектов изменяет пористость и проницаемость, перераспределение давления газа изменяет эффективные напряжения, а переход метана в свободное состояние формирует дополнительный энергетический вклад. Модели, основанные на газовом потоке, механике разрушения, энергетическом балансе и связанном деформировании, раскрывают отдельные стороны этого процесса [9–14], но остается необходимость в единой вычислительной структуре, сопровождающей переход от локальной активации до фрагментации и массопереноса.

В предлагаемой методологии базовая последовательность записывается как «параметр воздействия – критическое значение – рост – исчерпание». Обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение, характеризует совокупную интенсивность механического, энергетического, газомеханического или технологического воздействия на локальный объем массива; его критическое значение включает кинетику переходного процесса; закон роста задает скорость вовлечения материала в активную зону; механизм исчерпания ограничивает процесс при снижении доступной энергии, разгрузке газовой фазы или потере структурного ресурса среды. Такой подход является геомеханическим каркасом кинетики, первоначально выработанной и экспериментально проверенной для инициирования детонации во взрывчатых веществах при внешнем воздействии [15].

Физическая постановка методологии

Массив рассматривается как техногенно-нагружаемая неоднородная геосреда с исходным напряженным состоянием, структурной нарушенностью и при необходимости поровой или трещинной газовой фазой. Стадия переходного процесса описывается внутренней переменной F , для которой $0 \leq F \leq 1$: $F = 0$ соответствует докритическому состоянию локального объема, а $F \rightarrow 1$ – развитой активации локализованного разрушения. Переменная F не тождественна классической переменной поврежденности D . Величина D характеризует деградацию материала, тогда как F отражает степень вовлечения локального объема в развивающийся переходный процесс; при конкретной реализации D может входить в закон эволюции F или определять деградационные зависимости.

Обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение Ψ , не должен трактоваться как единая размерная физическая величина для всех классов задач. Для сдвигового разрушения он формируется с учетом интенсивности девиаторных напряжений, сопротивления сдвигу и гравитационного потенциала; для газоносного пласта – эффективных напряжений, давления газа, проницаемости и энергетического вклада газовой фазы; для взрывного воздействия – импуль-

сного давления, сдвигового нагружения и плотности локально переданной энергии. Критическое значение параметра воздействия Ψ_c разграничивает докритический и активный режимы, а отношение Ψ/Ψ_c используется как нормированный параметр воздействия. Универсальной является не физика источника, а пороговая структура цифрового описания.

В безразмерной форме один из феноменологических вариантов закона эволюции F имеет вид:

$$\frac{dF}{dt} = A(\Psi - \Psi_c)^{m(1-F)^n} + G F^{q(1-F)^r} - D_F F, \quad (1)$$

$$0 \leq F \leq 1$$

где $\langle \cdot \rangle$ – оператор положительной части; Ψ_c – критическое значение параметра воздействия; A и G – параметры инициирования и самоускоряющегося роста; m , n , q , r – показатели нелинейности; D_F – коэффициент затухания. Первое слагаемое описывает включение кинетики при превышении критического значения параметра воздействия, второе – развитие уже активированной области, третье – затухание или истощение ресурса. Вид закона и его параметры подлежат идентификации для каждого физического класса задач.

Связь F с механическими и фильтрационными свойствами может быть задана деградационными функциями:

$$E(F) = E_0(1 - \lambda_E F), \quad c(F) = c_0(1 - \lambda_c F), \quad (2)$$

$$\tan \varphi(F) = \tan \varphi_0(1 - \lambda_\varphi F)$$

где E_0 , c_0 и φ_0 – исходные значения модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения; λ_E , λ_c и λ_φ – коэффициенты деградации. Активная зона определяется как совокупность локальных объемов, для которых $F \geq F_{cr}$. Термин «пространственно-связная зона» используется в геометрическом смысле: первоначально разобщенные активированные участки образуют непрерывный кластер или поверхность, по которой возможны разгрузка, сдвиг либо перенос разрушенного материала.

Математическая и численная реализация

Континуальная основа цифровой модели задается законами сохранения массы, количества движения и энергии в лагранжевой форме. Напряжения представляются суммой шаровой и девиаторной частей; давление определяется уравнением состояния, а девиаторная реакция – выбранной упруго-пластической или повреждаемой моделью геосреды. Для газоносного угля дополнительно вводятся эффективные

напряжения и баланс газовой массы; при сквозном расчете взрыва используются уравнения состояния взрывчатого вещества и продуктов детонации.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} v, \quad \rho \frac{dv}{dt} = \operatorname{div} \sigma + \rho b,$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma : \varepsilon, \quad \sigma = -pI + s,$$

где ρ – плотность; v – скорость; σ – тензор напряжений; b – массовые силы; e – удельная внутренняя энергия; ε – тензор скоростей деформаций; p – давление; s – девиатор напряжений.

Для задач с большими деформациями, раскрытием трещин, образованием свободных поверхностей и фрагментацией целесообразна лагранжева бессеточная реализация. Метод сглаженных частиц описывает текущую конфигурацию материальными частицами, взаимодействующими через ядро сглаживания, и не требует перестроения конечно-элементной сетки при изменении топологии среды [16]. Для областей умеренных деформаций и задания граничных условий может применяться гибридная SPH/FEM-схема; применение SPH к разрушению и обрушению горных пород показано, в частности, в работе [17].

Дискретная аппроксимация поля A в точке x_i имеет вид

$$\langle A(x_i) \rangle = \sum_j \left(\frac{m_j}{\rho_j} \right) A_j W(x_i - x_j, h) \quad (4)$$

где m_j и ρ_j – масса и плотность соседней частицы j ; W – ядро сглаживания; h – длина сглаживания. В модифицированной постановке каждая частица дополнительно несет внутреннюю переменную F , локальный параметр воздействия Ψ и параметры деградирующей модели материала.

Для явной схемы критический временной шаг выбирается из условия Куранта:

$$\Delta t \leq C_{CFL} \frac{h}{c_{eff}} \quad (5)$$

где C_{CFL} – коэффициент устойчивости; c_{eff} – эффективная скорость распространения возмущений. Достоверность результата требует анализа чувствительности к размеру частиц, h , числу соседей, искусственной вязкости, контактными параметрам и шагу времени. Положение и размер активной зоны должны быть устойчивы к разумному изменению дискретизации, а энергетический баланс – согласован с выполненной внешней работой и внутренней диссипацией.



Рис. 1. Логика цифрового описания переходного процесса разрушения массива горных пород /
Fig. 1. Logic of digital description of a transient rock mass failure process

Сопряжение с цифровым управлением газовыделением

При высокоинтенсивной отработке угольных пластов газовый фактор является частью сопряженной геомеханико-аэрогазодинамической системы. Выработанные пространства, зона обрушения, дезинтегрированные породы, закрепное пространство, очистной забой и дегазационные каналы образуют связанную область метанопереноса, параметры которой зависят от степени разрушенности и проницаемости массива. Исходные данные включают аэродинамические сопротивления выработок [18], проницаемость обрушенных и уплотненных пород [19], дебиты метана, параметры дегазации и технологическую нагрузку на очистной забой.

Минимальная связь внутренней переменной с фильтрационно-емкостными свойствами может быть записана в виде

$$k(F) = k_0 \exp(\chi_F), \quad n(F) = n_0(1 + \chi_n F), \quad (6)$$

$$\sigma' = \sigma - b p_g I$$

где k – проницаемость; n – пористость или эффективная емкость трещинно-порового пространства; p_g – давление газа; b – коэффициент Био.

Рост F увеличивает нарушенность и проницаемость, а газовое давление изменяет эффективные напряжения в скелете угля. При этом корректно говорить о пространственно-временном перераспределении эффективных напряжений: в приконтурной зоне возможно снижение бокового обжатия и рост сдвиговых или растягивающих компонент, тогда как в соседних участках возникает дополнительная концентрация напряжений.

Баланс газовой массы в повреждаемом порово-трещинном объеме представляется соотношением

$$\frac{\partial(n(F)p_g)}{\partial t} + \text{div}(p_g v_g) = Q_{\text{des}}(F, p_g) - Q_{\text{out}}(F, k, p_g). \quad (7)$$

На ранней стадии доминирует источник Q_{des} , связанный с десорбцией и переходом метана в свободное состояние. После формирования пространственно-связной трещиноватой сети возрастает расходный член Q_{out} , определяющий филь-

трационную разгрузку в сторону выработки или выработанного пространства. Смена доминирующего режима газового баланса проявляется в характерных изломах временных зависимостей F , p_g , k и массового расхода $q(t)$.

Рисунок 2 имеет методический, а не экспериментальный характер. До порогового момента t_c повреждение накапливается локально и не образует непрерывного канала разгрузки. При коалесценции дефектов проницаемость возрастает быстрее, чем степень активации, давление газа резко перераспределяется, а массовый вынос достигает максимума при одновременном сохранении градиента давления и потере прочности углепородной пробки выброса. Такой механизм согласуется с представлением о выбросе как о многостадийном энергетически обусловленном процессе [8–14] и с расчетами динамического воздействия на выбросоопасный уголь [20].

Цифровое описание взрывного и динамического воздействия

Взрывное воздействие рассматривается как технологически управляемый канал подвода энергии к массиву. Современные исследования показывают возможность использования специально спроектированного взрыва для управления напряженным состоянием и характером обрушения кровли [7]. Для исследования механизма разрушения необходимо сохранять сквозную цепочку: детонационное энерговыделение – расширение продуктов взрыва – волновое нагружение – рост поврежденности – формирование активной зоны – дробление и фрагментация.

Для продуктов детонации в сквозной постановке может применяться уравнение состояния JWЛ

$$p = A(1 - \omega/(R_1 V)) \exp(-R_1 V) + B(1 - \omega/(R_2 V)) \exp(-R_2 V) + \omega E/V \quad (8)$$

где V – удельный относительный объем; E – удельная энергия; A , B , R_1 , R_2 и ω – параметры уравнения состояния. Давление, форма импульса и продолжительность нагружения в этом случае являются результатом расчета. Для горной поро-

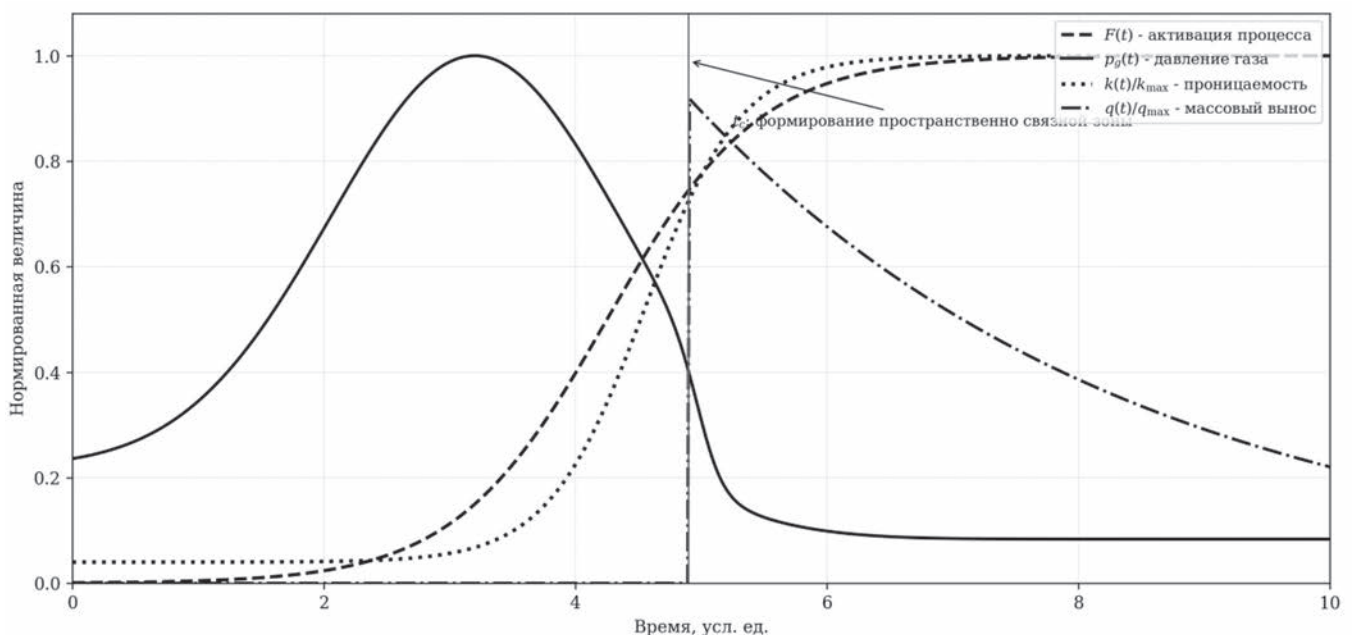


Рис. 2. Схематическая стадийная динамика газомеханического перехода; все величины нормированы /
Fig. 2. Schematic staged dynamics of the gas-mechanical transition; all quantities are normalized

ды необходимы давлениезависимая прочность, накопление поврежденности и деградация параметров, иначе переход от упругой волны к дроблению будет задаваться численным удалением элементов, а не физической моделью.

Кинетическая структура «иницирование – рост – завершение» известна в феноменологических моделях ударного инициирования энергетических материалов [15]. В геомеханическом приложении переносится только структура пороговой кинетики, но не химико-детонационная физика.

Один из вариантов локального параметра взрывного воздействия имеет вид

$$P_{\text{exp}} = D \left[\frac{w_{\tau} \tau_{\text{eq}}}{\tau_f(F, p)} + \frac{w_p \langle p \rangle}{p_{\text{ref}}} + \frac{w_E E_{\text{loc}}}{E_{\text{ref}}} \right], \quad (9)$$

где D – мера исходной или накопленной поврежденности; τ_{eq} – эквивалентное сдвиговое напряжение; $\tau_f(F, p)$ – текущая прочность; p положительная для выбранного механизма часть импульсного давления; E_{loc} – локально переданная энергия; w_{τ} , w_p и w_E – весовые коэффициенты. Такая запись подчеркивает, что результат определяется не только пиковой амплитудой давления, но и длительностью импульса, трещиноватостью, текущим сопротивлением среды и локальным энергетическим балансом. Влияние взрывного воздействия на газодинамическое состояние выбросоопасного угля подробно рассмотрено в работе [20].

Достоверность, ограничения и область применения

Доказательность цифровой модели не может основываться только на визуальном соответствии расчетных картин ожидаемому сценарию. Необходимы: проверка законов сохранения массы и импульса; контроль внутренней, кинетической и диссипированной энергии; исследование сходимости положения и размера активной зоны; сопоставление временных масштабов, скоростей, зон разрушения и фрагментации с аналитическими, экспериментальными или натурными данными. Для газомеханической постановки дополнительно контролируются баланс газовой массы и согласованность единиц измерения, для взрывной – применимость параметров уравнений состояния и корректность контакта продуктов взрыва с массивом.

Основные численные неопределенности и ограничения расчетной схемы связаны с растягивающей неустойчивостью SPH, зависимостью ширины зоны локализации от h и межчастичного расстояния, чрезмерным сглаживанием фронтов,

некорректным заданием искусственной вязкости, нарушением устойчивости явной схемы, ошибками контактного взаимодействия и возможной потерей массы при эрозионных алгоритмах. Поэтому параметры F , Ψ и Ψ_c не должны рассматриваться как произвольные подгоночные коэффициенты: они идентифицируются по независимым механическим, фильтрационным и энергетическим данным и проверяются на нескольких сценариях нагружения.

Область применения методологии включает сценарный анализ выбросоопасности, формирование поверхностей сдвига, динамическое разрушение приконтурных зон и оценку результатов взрывного воздействия. Методология не заменяет нормативные расчеты промышленной безопасности, а дополняет их инструментом анализа развития переходного события после локального достижения предельного состояния.

Заключение

1. Предложена энергетико-кинетическая методология, в которой разрушение массива описывается последовательностью «обобщенный параметр воздействия, вызывающего разрушение Ψ – критическое значение параметра воздействия Ψ_c – нормированный параметр воздействия Ψ/Ψ_c – рост F – формирование активной зоны – локализация – опасное или технологическое событие».

2. Внутренняя переменная F отделена от классической поврежденности D : F характеризует стадию вовлечения локального объема в переходный процесс, а D – деградацию свойств материала.

3. Модифицированная SPH/SPH-FEM-реализация обеспечивает сопровождение больших деформаций, потери сплошности и фрагментации без априорного задания поверхности разрушения, но требует обязательного контроля величины шага по времени, длины сглаживания, контакта, сходимости и энергетического баланса.

4. Сопряжение механики, проницаемости и газового баланса позволяет интерпретировать выбросоопасный переход как формирование пространственно-связной активной зоны; сквозной расчет взрыва связывает параметры энерговыделения с волновым нагружением, дроблением и фрагментацией.

5. Практическое назначение методологии состоит в расчетном различении субкритических, пороговых и надкритических сценариев и в получении инженерно интерпретируемых показателей для анализа устойчивости, газодинамической опасности и параметров динамического воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lin Q., Cao R., Meng J. Recent Advances in Rock Mass Engineering. *Applied Sciences*. 2025; 15 (23): 12752. <https://doi.org/10.3390/app152312752>.
2. Xie S., Li J., Wang S., et al. An experimental investigation on the dynamic shear characteristics of wet joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025; 194: 106193. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106193>.
3. Lin Q., Zhang S., Lin H., et al. Failure behavior of jointed rock masses containing a circular hole under compressive-shear load: Insights from DIC technique. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025; 139: 105089. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105089>.
4. Ma Q., Liu X., Tan Y., et al. Experimental study of loading system stiffness effects on mechanical characteristics and kinetic energy calculation of coal specimens. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024; 57: 9941-9957. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04054-7>.
5. Xue H., Wang Y., Yang W., et al. Experimental and numerical study of damage evolution and fracture characteristics of three-layer composite rocks under dynamic loading. *Applied Sciences*. 2025; 15: 10369. <https://doi.org/10.3390/app151910369>.
6. Tang Q., Xie W., Jing S., et al. Experimental and numerical investigation on the mechanical behavior of rock-like material with complex discrete joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024; 57: 4493-4511. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03784-y>.
7. Fu Q., Yang J., Gao Y., et al. Combined blasting for protection of gob-side roadway with thick and hard roof. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024; 16: 3165-3180. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.027>.
8. Lama R. D., Bodziony J. Management of outburst in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*. 1998; 35 (1-4): 83-115. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00037-2).

9. Paterson L. A model for outbursts in coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1986; 23 (4): 327-332. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90644-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90644-3).
10. Otuonye F., Sheng J. A numerical simulation of gas flow during coal/gas outbursts. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1994; 12: 15-34. <https://doi.org/10.1007/BF00425934>.
11. Odintsev V. N. Sudden outburst of coal and gas - failure of natural coal as a solution of methane in a solid substance. *Journal of Mining Science*. 1997; 33 (6): 508-516. <https://doi.org/10.1007/BF02765629>.
12. Valliappan S., Zhang W. H. Role of gas energy during coal outbursts. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999; 44 (7): 875-895.
13. Xu T., Tang C. A., Yang T. H., et al. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 43 (6): 905-919. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.01.001>.
14. Wold M. B., Connell L. D., Choi S. K. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2008; 75 (1): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.01.006>.
15. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Physics of Fluids*. 1980; 23 (12): 2362-2372. <https://doi.org/10.1063/1.862940>.
16. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*. 2005; 68 (8): 1703-1759. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>.
17. Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Метод сглаженных частиц в моделировании разрушения и обрушения кровли выработки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; S49: 464-475. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475>.
- Malinnikova O. N., Trofimov V. A., Shipovskii I. E. Smoothed particle hydrodynamics in modeling failure and roof caving in a mine working. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018; S49: 464-475. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475>.
18. Говорухин Ю. М., Кубрин С. С. О значениях коэффициентов аэродинамических сопротивлений трения горных выработок больших поперечных сечений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024; 2: 425-439.
- Govorukhin Yu. M., Kubrin S. S. On the values of aerodynamic friction resistance coefficients for mine workings with large cross-sections. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2024; 2: 425-439. (In Russ.).
19. Говорухин Ю. М., Кубрин С. С. О проницаемости обрушенных и дезинтегрированных пород в выработанном пространстве выемочных участков при высокоинтенсивной отработке пластов угля. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2025; 1: 5-20. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001>.
- Govorukhin Yu. M., Kubrin S. S. On the permeability of caved and disintegrated rocks in the goaf of extraction panels during high-intensity coal seam mining. *Bulletin of the Scientific Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025; 1: 5-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001>.
20. Одинцев В. Н., Шиповский И. Е. Моделирование влияния взрывного воздействия на газодинамическое состояние пачки выбросоопасного угля. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019; 4: 46-57. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190406>.
- Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Modeling the effect of blasting on the gas-dynamic state of an outburst-prone coal band. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2019; 4: 46-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190406>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Сергеевич Кубрин –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией горнотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: s_kubrin@mail.ru,

Иван Евгеньевич Шиповский –

канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: iv_ev@mail.ru

Критерии авторства: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.06.2026

Поступила после рецензирования: 18.06.26

Принята к публикации: 23.06.2026

ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. Kubrin –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Mining and Technological Risks in the Development of Gas-Bearing Coal and Ore Deposits, Academic Secretary, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: s_kubrin@mail.ru,

Ivan E. Shipovskii – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Multiphase Processes in Rock Masses during Deposit Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: iv_ev@mail.ru

Contribution: The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 10.06.2026

Revised: 18.06.26

Accepted: 23.06.2026