

## НОВЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ В КВАЗИУСТОЙЧИВЫХ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ LEE–TARVER

И. Е. Шиповский\*, В. А. Трофимов

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия*

*\*E-mail: IV\_EV@mail.ru*

*Контекст и проблема.* Внезапные выбросы угля и газа в газонасыщенных пластах характеризуются пороговостью, высокой скоростью развития и массовым выносом в выработку. Классические методы (пороупругость, критерии прочности, модели повреждения) не воспроизводят пороговый переход «устойчивое состояние → активированное разрушение → выброс» без эвристических переключателей режимов и часто чувствительны к численным параметрам.

*Цель и задачи.* Разработать воспроизводимый методический каркас применения кинетики Lee–Tarver (Ignition & Growth) для моделирования порогового перехода при выбросах как динамического дополнения к критериальным методикам оценки безопасности. Основные задачи: (1) адаптация структуры I&G к геомеханической постановке с переопределением переменной прогресса как доли активированного угля; (2) разработка набора входных и выходных показателей; (3) формирование практического алгоритма применения на шахте.

*Методический подход.* Предложено переопределение внутренней переменной прогресса  $F$  как доли активированного (поврежденного, газоотдающего) состояния угля с управляющим параметром, включающим газовый фактор (перепад давления), эффективные напряжения скелета и динамическую компоненту (интенсивность деформаций). Кинетика представлена трехчленной структурой: инициирование (пороговый запуск активной зоны при критических напряжениях и давлении), рост (лавинное развитие за счет положительной обратной связи «повреждение → проницаемость → газоразгрузка → разрушение») и затухание (исчерпание ресурса сорбированного газа и диссипация нагрузки). Идентификация параметров проводится по аналогам pop-plot (время до события vs нагрузка) и run-distance (длина разгона vs нагрузка), построенным на основе лабораторных испытаний и шахтного мониторинга.

*Основные результаты.* Сформулированы формы членов кинетики для инициирования, роста и затухания с явным описанием скорости перехода состояния. Разработаны функции деградации свойств угля (жесткость, прочность, проницаемость, пористость) в зависимости от уровня активации  $F$ , отражающие резкую нелинейность проницаемости при повреждении. Предложен практический пятиэтапный алгоритм применения на шахте: формирование входных данных, калибровка параметров модели, сценарный расчет выбросоопасности, интеграция с критериальной оценкой, выбор превентивных мероприятий. Составлена комплексная таблица входных показателей (газовое давление, напряженное состояние, параметры дегазации) и выходных метрик (время до события, длина разгона, максимальная доля активации, пик дебита, интегральный показатель безопасности).

*Научная новизна и практическая значимость.* Явное введение скорости перехода состояния через трехстадийную кинетику исключает потребность в эвристических переключателях режимов и повышает устойчивость численного прогноза пороговых явлений. Подход объединяет динамическое моделирование (методом сглаженных частиц, SPH) с интегральными оценками безопасности, обеспечивая ранжирование участков по риску и обоснованный выбор мер (дегазация, разгрузочные скважины, оптимизация взрывных работ, изменение темпа проходки). Физические параллели между детонацией в ВВ и внезапным выбросом (локальные очаги инициирования, положительная обратная связь, исчерпание энергетического ресурса) оправдывают перенос каркаса Lee–Tarver на геодинамическую задачу.

*Ограничения и перспективы.* Методика требует достаточной базы экспериментальных данных для калибровки параметров, включая испытания образцов угля, и корректного многопараметрического

мониторинга газового режима в пласте. Дальнейшие исследования направлены на расширение подсистемы газообмена (сорбция/десорбция по модели Лэнгмюра), верификацию по натурным многопараметрическим данным шахт и создание цифровых двойников выбросоопасных участков для оптимизации управления риском в реальном времени.

*Выводы.* Применение кинетики Lee–Tarver в сочетании с методом сглаженных частиц представляет эффективный инструмент для численного моделирования выбросов угля и газа в газонасыщенных пластах, учитывающий большие деформации, фрагментацию и сложное взаимодействие механических и газодинамических процессов. Предложенный методический каркас успешно воспроизводит пороговый режим развития процесса без эвристических вмешательств и может быть внедрен в практику оценки безопасности горных работ как динамическое дополнение к существующим критериальным методикам, (подход Яхеева), обеспечивая обоснованное управление риском выбросов на уровне участка и забоя.

## **SIMULATION THE THRESHOLD TRANSITION IN SUDDEN OUTBURSTS IN GAS-SATURATED COAL SEAMS: THE NEW KINETIC APPROACH BASED ON LEE–TARVER THEORY**

**I. E. Shipovsky\*, V. A. Trofimov**

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail.: IV\_EV@mail.ru*

Sudden outbursts of coal and gas in gas-saturated seams are characterized by threshold behavior, rapid propagation rates, and catastrophic material ejection into mine workings. Classical approaches – including poroelasticity, strength criteria, and damage models – fail to reproduce the threshold transition from stable equilibrium through activated failure to dynamic rupture without ad hoc regime-switching mechanisms and often exhibit sensitivity to numerical parameters.

We develop a reproducible methodological framework applying Lee–Tarver kinetics (Ignition & Growth) to model the threshold transition governing sudden outbursts as a dynamic complement to safety assessment criteria. Primary tasks include: (1) adapting the I&G structure to geomechanical formulation by redefining the progress variable as the activated (damaged, gas-releasing) fraction of coal; (2) establishing input and output metrics; (3) formulating a practical five-step operational algorithm for field implementation

*Methodology.* We redefine the internal progress variable  $F$  as the activated coal fraction, controlled by a composite parameter incorporating gas overpressure, effective skeleton stresses, and deformation-rate intensity. Three-stage kinetics is proposed: ignition (threshold activation of failure zones at critical stress and pressure), growth (avalanche development via positive feedback: damage  $\rightarrow$  permeability  $\rightarrow$  gas unloading  $\rightarrow$  fracture), and decay (adsorbed gas depletion and load dissipation). Parameter identification relies on pop-plot (time-to-event vs. load) and run-distance (run-up length vs. load) analogues constructed from laboratory testing and mine monitoring data.

*Results.* We formulate kinetic rate laws for ignition, growth, and decay stages with explicit description of state-transition velocity. Coal property degradation functions – accounting for stiffness, strength, permeability, and porosity changes as functions of activation level  $F$  – capture the pronounced nonlinearity of permeability upon damage. A practical five-stage algorithm is proposed: (1) input data assembly; (2) model parameter calibration; (3) outburst-hazard scenario calculations; (4) integration with criteria-based safety assessment; (5) selection of preventive measures. Comprehensive tables specify input metrics (gas pressure, stress state, degassing parameters) and output indicators (time-to-event, run-up length, peak activation fraction, gas discharge rate, integral safety index).

*Scientific Innovation.* Explicit incorporation of state-transition rate through three-stage kinetics eliminates reliance on heuristic regime switches and enhances robustness of threshold-phenomenon forecasting. The approach unifies dynamic simulation (via smoothed particle hydrodynamics) with integral safety assessment, enabling risk-stratified ranking of mine sectors and justified selection of mitigation measures (degassing,

stress-relief wells, blasting optimization, extraction-rate adjustment). Physical analogues between explosive detonation and coal-gas outbursts – including local ignition sites, positive feedback loops, and energy resource exhaustion – justify transferring the Lee–Tarver framework to geodynamic applications.

*Prospects.* The methodology requires sufficient experimental data for parameter calibration, including coal sample testing, and robust multiparametric in-situ gas-regime monitoring. Future work will expand gas-exchange modeling (adsorption/desorption via Langmuir kinetics), verify predictions against multiparametric field data, and develop digital twins of outburst-prone zones for real-time risk management optimization.

*Conclusions.* Lee–Tarver kinetics combined with SPH method provides an effective computational tool for modeling sudden coal-and-gas outbursts in gas-saturated seams, accommodating large deformations, fragmentation, and complex mechanical-gas-dynamic coupling. The proposed framework successfully reproduces threshold-driven dynamics without ad hoc intervention and is readily deployable as a dynamic enhancement to existing mining safety assessment methodologies, enabling defensible outburst-risk management at the panel and face level.