

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫЕМКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Карасев М.А., Вербило П.Э., Шишкина В.С.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: численное моделирование, геомеханика, обрушение кровли, трещиноватость, деформации, устойчивость массива, геомеханические процессы, напряжённо-деформированное состояние, физическое моделирование, Abaqus Explicit.

Аннотация. Рассмотрены вопросы оценки устойчивости кровли при подземной выемке полезных ископаемых с использованием методов физического и численного моделирования. В качестве исходных данных использованы опубликованные результаты крупномасштабного лабораторного эксперимента, в котором была воспроизведена стратифицированная структура массива и поэтапная отработка. На основе этих данных выполнено численное моделирование в среде Abaqus Explicit с сохранением геометрии, стратиграфии и механических параметров, аналогичных физической модели. Также проведено сравнение с результатами моделирования, выполненного в UDEC, что позволило оценить достоверность подходов. Анализ показал, что разрушение кровли происходит вследствие формирования раскрытых трещин и потери устойчивости массива, формируя характерную трапецидальную зону обрушения. Установлена корреляция между развитием поперечных трещин, ростом горизонтальных напряжений и приближением к обрушению. Полученные результаты могут быть использованы для оценки рисков, разработки прогностических критериев и совершенствования методов контроля устойчивости в подземных условиях.

NUMERICAL AND PHYSICAL MODELING OF ROOF INSTABILITY MECHANISMS DURING UNDERGROUND RESOURCE EXTRACTION

Karasev M.A., Verbilo P.E., Shishkina V.S.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: numerical modeling, geomechanics, roof collapse, fracturing, deformation, rock mass stability, geomechanical processes, stress-strain state, physical modeling, Abaqus Explicit.

Abstract. The study addresses the assessment of roof stability during underground mineral extraction using physical and numerical modeling methods. As input data, previously published results of a large-scale laboratory experiment were used, in which a stratified rock mass and staged excavation process were reproduced. Based on these data, numerical modeling was performed in Abaqus Explicit, preserving the geometry, stratigraphy, and mechanical properties consistent with the physical model. A comparison was also made with simulation results obtained using UDEC, which allowed for an evaluation of the reliability of the approaches. The analysis showed that roof collapse occurs due to the formation of open fractures and loss of mass stability, resulting in a characteristic trapezoidal failure zone. A correlation was identified between the development of transverse cracks, an increase in horizontal stresses, and the approach of collapse. The findings can be applied for risk assessment, development of predictive criteria, and improvement of stability control methods under underground mining conditions.

Введение

Ведение горных работ приводит к возникновению сложных геомеханических процессов, которые без должного надзора могут развиваться до потенциально катастрофических последствий. Подземная выработка угля длинными очистными забоями требует постоянного и детального изучения механизмов разрушения и мониторинга напряженного состояния массива для обеспечения безопасности и контроля горного давления. При разработке месторождений возможно образование пустот или же несущих кровель. Несущие кровли представляют собой протяженные участки выработки, формирующиеся в условиях высокой прочности пород массива, залегающих над вырабатываемым пространством. Они могут не обрушаться, а нависать на большом расстоянии, образуя «нависающую» кровлю. Данные участки могут постепенно ослабляться

и внезапно обрушиться с образованием зоны разрушения породы, выброса воздуха, а также формирования разрушительной сейсмической активности в зоне влияния выработки [1].

Предотвращение внезапного обрушения кровли возможно лишь при системном управлении горным давлением. Оно основано на постоянном контроле напряжённо-деформированного состояния массива и применении инженерных решений, опирающихся на понимание механизмов деформации массива [2]. По мере выемки угля, во вмещающих породах над очистным пространством происходит перераспределение горизонтальных и вертикальных напряжений. Также для данных участков характерно развитие изгибных деформаций, трещинообразование и расслоение пород кровли [3, 4].

Одним из характерных признаков потери устойчивости кровли является рост горизонтальных напряжений. Многократное увеличение относительно исходного состояния свидетельствует о накоплении внутренних напряжений и перераспределении нагрузок вокруг выемочного пространства [5]. Не менее важным признаком служит то, как изменяется динамика вертикальных перемещений кровли. Ускоряющаяся просадка, возникновение локальных разрывов показывают, что массив переходит в предельное состояние. В подобных условиях только своевременное отслеживание деформаций даёт возможность на раннем этапе распознать начало потери устойчивости и предотвратить их аварийное развитие [6, 7].

Ключевое значение в понимании процессов потери устойчивости кровли при различных геомеханических условиях имеет использование как физических, так и численных моделей [2-4]. При создании физических моделей, исследователи сталкиваются с рядом ограничений, таких как материальное оснащение лабораторий. Не всегда есть оборудование, способное точно воспроизвести сложные геомеханические процессы. Кроме того, возникают трудности с масштабированием. Лабораторные модели не всегда позволяют отразить реальные напряжения и деформации, происходящие в массиве горных пород. Также проблемой становится ограниченная повторяемость экспериментов. Сборка моделей требует точности и времени, а поведение материалов может отличаться в каждом опыте. Это затрудняет получение стабильных и воспроизводимых результатов [8, 9].

Современные численные методы моделирования играют ключевую роль в изучении процессов обрушения кровли при подземной добыче. Они позволяют учитывать взаимодействие блоков, накопление напряжений, трещиноватость и переход к динамическому разрушению, что недоступно в таком объёме при аналитических или физических подходах [10]. Благодаря высокой точности и визуализации, численные модели эффективно описывают пространственно-временное поведение напряжений, деформаций и разрушений, а также помогают определить зоны концентрации нагрузок и рассчитать допустимые параметры выработки [11]. Эти методы способны моделировать сложные физические явления, включая крупные деформации, оседание кровли и разрушение выработанного пространства, обеспечивая надёжные результаты, подтверждённые верификацией и соответствием данным натурных и лабораторных исследований [12-14].

Целью настоящего численного исследования является воспроизведение механизмов и признаков потери устойчивости внезапного масштабного обрушения кровли при отработке угольных пластов длинными забоями, с опорой на ранее проведённый физический эксперимент и верифицированную численную модель. Моделирование в Abaqus Explicit позволило уточнить характер разрушения, характеризующегося образованием поперечных трещин в центральной части кровли выработанного пространства. Геометрия численной модели была построена на основе данных физического эксперимента, проведенного институтом исследования угля Китая, что обеспечило возможность перекрёстной проверки. Полученное соответствие результатов подтверждает применимость численного подхода для анализа рисков и разработки мер по предупреждению потери устойчивости кровли.

Материалы и методы исследований

Физическое моделирование

Физическое моделирование проводилось в лаборатории геомеханики института исследования угля Китая. Эксперименты выполнялись на крупномасштабном моделирующем

комплексе, предназначенном для имитации разработки угля длинными очистными забоями [1]. Размеры моделей достигали 5 метров в длину, что позволяло имитировать квази-трёхмерные условия обрушения. Конфигурация модели была основана на геологических условиях лавы W2302 на шахте Сыхэ (северо-запад Китая), что обеспечило привязку к реальному горнотехническому объекту.

Квази-трёхмерные условия обрушения представляют собой формат физического моделирования, при котором основные характеристики объёмного (трёхмерного) поведения горного массива воспроизводятся в упрощённой геометрии. Несмотря на ограниченную толщину модели, её длина и высота позволяют отразить ключевые пространственные процессы, такие как развитие трещин, перераспределение напряжений и обрушение кровли. За счёт специальных граничных условий и подбора масштабов модель демонстрирует поведение, близкое к реальным трёхмерным условиям, что даёт возможность глубже понять поведение массива без создания полноценной трёхмерной модели.

Суть эксперимента заключалась в воспроизведении условий внезапного масштабного обрушения кровли в выработанном пространстве при разработке угольных пластов, с акцентом на выявление механизмов разрушения и признаков потери устойчивости. Эксперимент выполнялся по методике, представленной на рисунке 1. Сначала осуществлялось послойное формирование модели с учётом геологической стратификации. Затем в каждый слой вводились поперечные трещины, устанавливались тензометрические датчики, и проводилось предварительное нагружение массива. Каждый слой модели укладывался с соблюдением проектной толщины и уплотнялся для достижения заданной прочности. Поперечные трещины формировались путём надрезов на фиксированном расстоянии, что имитировало существующие зоны ослабления в кровле. Для создания напряжённого состояния использовалась система внешней загрузки, моделирующая вертикальное и горизонтальное горное давление. После стабилизации напряжённого поля проводилась поэтапная имитация выемки угольного пласта. На каждом этапе фиксировались реакции массива, включая деформации, развитие трещин и момент обрушения.

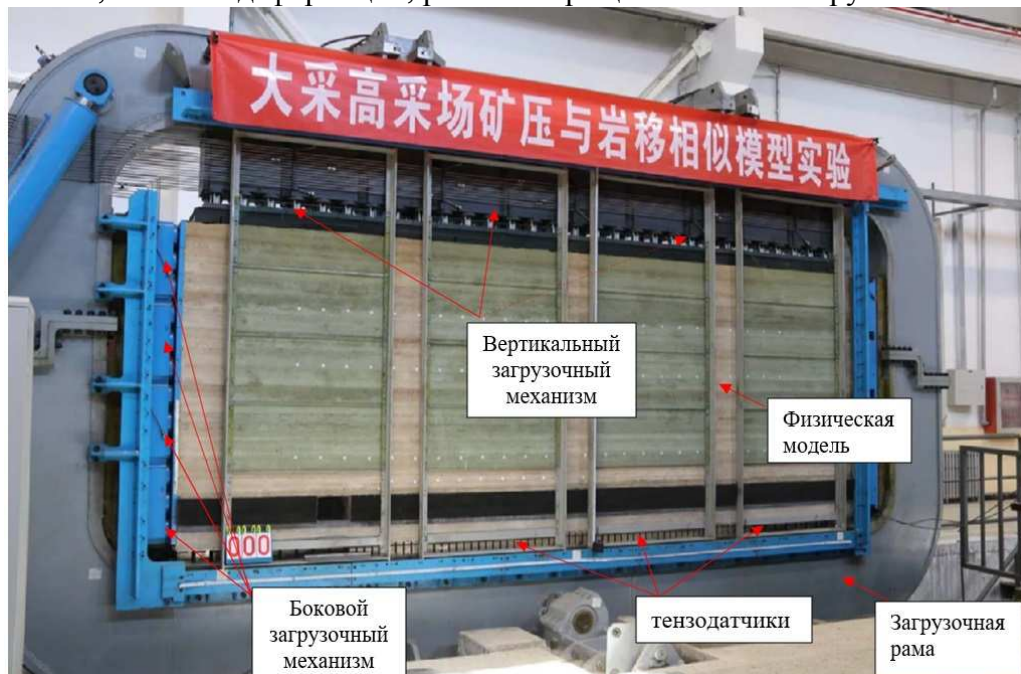


Рис. 1. Устройство для физического моделирования выемки угля [1]

Для создания модели применялись материалы, обеспечивающие подобие реальным условиям по прочностным и деформационным характеристикам. Слои имитировали пять типов пород, включая уголь, песчаный аргиллит, мелкозернистый песчаник, алевролит и глинистый сланец. Смеси состояли из песка, гипса, кальцита, воды и замедлителя, при этом геометрические и прочностные параметры соответствовали требованиям теории подобия.

Контактные поверхности слоев в модели имитировались с помощью тонких слюдяных пластин, повторяющих границы между слоями пород. Для регистрации напряжений в тело модели встраивались тензодатчики, изготовленные из материала, аналогичного материалу породы. Механические характеристики материалов, использованных в физической модели, представлены в таблице 1 [1].

Табл. 1. Механические характеристики материалов физической модели [1]

Материал	σ_s , МПа	σ_p , МПа	E, ГПа	ν
Угльный пласт	0,698	0,0639	0,187	0,122
Песчаный аргиллит	0,747	0,0748	0,2	0,269
Мелкозернистый песчаник	1,074	0,0964	0,371	0,089
Алевролит	0,905	0,152	0,274	0,167
Глинистый сланец	0,348	0,0497	0,148	0,139

Сравнение результатов физического моделирования с натурными данными показало хорошее соответствие по значениям сопротивления, создаваемого крепью. После масштабирования данные трёх этапов обрушения показали, что среднее сопротивление составляло от 7468 до 9458 кН, а после завершения циклов нагрузки достигало 8340-10247 кН. В процессе развития обрушений наблюдались характерные изменения в распределении опорного давления. После первого и второго обрушений давление на почве снижалось, особенно вблизи забоя. Однако третье обрушение сопровождалось резким его ростом, что связано с разрушением основного слоя кровли. Данный слой ранее распределял нагрузку в стороны.

Одним из самых надёжных признаков приближающегося обрушения стало резкое увеличение горизонтального напряжения. Перед третьим обрушением оно увеличилось с трёх до семи раз по сравнению с исходным уровнем. Вертикальное напряжение в этот период также изменялось, но значительно менее выражено.

Сам характер обрушения соответствовал механизму обрушения при сжатии, при котором трещинообразование происходило поперёк направления забоя, преимущественно в центральной части кровли. Обрушения фиксировались на различных этапах выемки. Первое сопровождалось разрушением кровли длиной 2100 мм и глубиной 190 мм, второе – на глубину до 540 мм, а третье – до общей толщины 1180 мм. Общая высота разрушенной зоны после трёх обрушений составила 1520 мм. Установлены характерные углы обрушения: 60 градусов у лба забоя и 55 градусов с противоположной стороны. Также были выделены две зоны уплотнения пород: одна в выработанном пространстве, другая-вертикально над забоем. Наблюдалась наклонная зона раскрытых трещин, проходящая через всю высоту обрушения.

Численное моделирование

В оригинальном исследовании предлагается верификация физической модели в программном решении UDEC, выполненном с использованием метода дискретных элементов. Геометрия модели была построена на основе параметров физического эксперимента. В численной модели были воспроизведены как 17 слоев, так и блочная структура, имитирующая кирпичики. Все элементы были созданы так, чтобы соответствовать тем, что использовались при физическом воспроизведении. При этом поперечным стыкам задавались более высокие механические характеристики по сравнению с горизонтальными элементами. Такое различие обусловлено тем, что в физической модели слои имитировались с использованием слюдяных пластин, которые снижали прочность контактов между ними, тогда как поперечные стыки не имели аналогичных зон ослабления.

Аналогично модели, реализованной в среде UDEC, была построена численная модель в программном комплексе Abaqus Explicit. Она сохранила аналогичную геометрическую конфигурацию и параметры, заданные в дискретно-элементной модели. В отличие от UDEC, где используется метод дискретных элементов, данная модель была реализована на основе метода конечных элементов. Для корректного расчёта задачи с имитацией разрушения блоков применялся явный интегратор времени в модуле Explicit. Все характеристики материалов

были заданы в виде численных значений физических и механических параметров, собранных в виде таблиц свойств. Для достижения соответствия с физической моделью, в численном моделировании были приняты те же стратиграфические условия. Всего использовалось 17 слоёв искусственного материала, что обеспечило воспроизведение высоты массива пород в 1.85 метра. Толщина слоев представлена в таблице 2.

Табл. 2. Толщины слоев

№ слоя	Тип породы	Толщина, м	№ слоя	Тип породы	Толщина, м
1	Алеврит	0,05	10	Глинистый сланец	0,125
2	Песчаный аргиллит	0,025	11	Мелкий песок	0,425
3	Уголь	0,15	12	Песчаный аргиллит	0,175
4	Глинистый сланец	0,05	13	Мелкий песок	0,1
5	Алеврит	0,1	14	Песчаный аргиллит	0,2
6	Глинистый сланец	0,05	15	Алеврит	0,025
7	Мелкий песок	0,15	16	Песчаный аргиллит	0,05
8	Песчаный аргиллит	0,025	17	Мелкий песок	0,025
9	Алеврит	0,125			

Одним из заметных преимуществ метода конечных элементов в среде Abaqus Explicit по сравнению с дискретно-элементным подходом, реализованным в UDEC, является способность более детально отслеживать распределение напряжений, деформаций и развитие зон пластических изменений в массиве. FEM-модель позволяет учитывать сложные нелинейные свойства материалов, контактные взаимодействия и механизмы разрушения, используя при этом расширенные конститутивные описания. Такой подход особенно важен при анализе поведения сплошных участков кровли, которые деформируются и накапливают повреждения вплоть до разрушения, а не ведут себя как изолированные жёсткие блоки.

В отличие от UDEC, где структура массива заранее разбивается на отдельные блоки и трещины, метод конечных элементов в Abaqus позволяет моделировать разрушение сплошной среды без предварительного задания геометрии разрушения. Это даёт возможность отслеживать процесс появления новых трещин и фрагментации, возникающих в ответ на перераспределение напряжений в ходе деформации. Кроме того, модуль Explicit хорошо подходит для задач, связанных с динамикой и быстро развивающимися процессами, такими как внезапное обрушение кровли, поскольку он эффективно справляется с контактными взаимодействиями и нелинейным поведением без необходимости итерационного решения на каждом шаге расчёта. Внешний вид модели с учетом всех слоев в Abaqus представлен на рисунке 2.

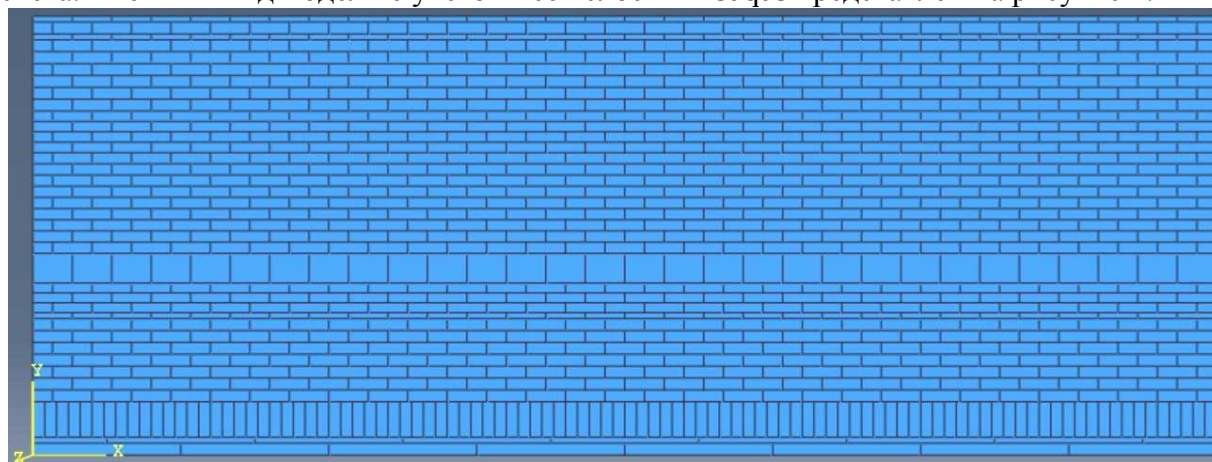


Рис. 2. Численная модель в программном решении Abaqus

Результаты

При моделировании, особое внимание в модели уделялось воспроизведению закономерностей обрушения кровли, тесно связанных с распределением горного давления.

Зона разрушения, как и в физическом эксперименте, имела характерную трапецевидную форму, определяемую высотой обрушения и углами откоса в пределах очистного забоя. На рисунке 3 приведены результаты моделирования обрушения кровли и соответствующей высоты разрушения, выполненные в среде Abaqus Explicit, программном комплексе UDEC [1], а также полученные в ходе физического эксперимента [1].

На заключительной стадии расчёта были определены углы обрушения: 57° со стороны левой границы и 59° у лба забоя (рис. 3, а). Эти значения сопоставимы с результатами физического эксперимента, где были зафиксированы углы 55° и 60° (рис. 3, б), а также с моделью в UDEC, в которой получены углы 57° и 58° (рис. 3, в).

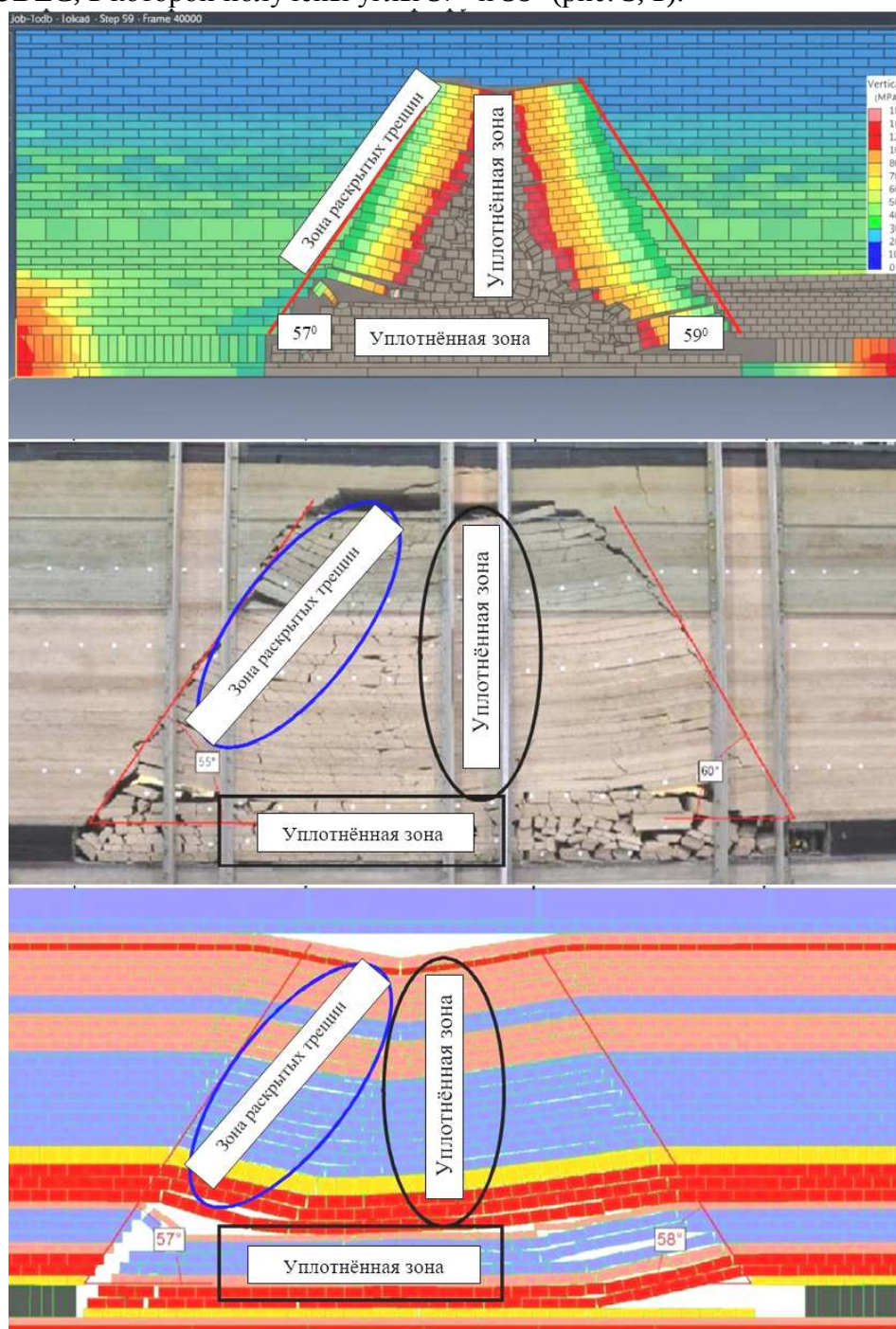


Рис. 3. Углы обрушения и характер трещиноватости, полученные:
а) Abaqus, б) в физическом эксперименте [1], в) в моделировании UDEC [1]

Обрушение кровли связано с накоплением повреждений в массиве. Постепенно формируется сеть трещин, затрагивающая как отдельные слои, так и области между ними.

Как правило, разрушение начинается с расслоения пород в кровле выработки, а затем переходит в их полное разрушение. В пределах трапециевидальной зоны обрушения наблюдаются раскрытые трещины. Они формируют пустотные участки по обе стороны от центральной части. Такие участки обозначаются как открытая трещиноватая зона. В центральной части, напротив, наблюдается уплотнение. Такое поведение свидетельствует о перераспределении напряжений и развитии локального разрушения.

Для оценки перераспределения напряжений вдоль почвы угольного пласта был использован коэффициент концентрации напряжений, выражаемый как отношение текущего напряжения к начальному (рис. 4).

Максимальные значения в разных моделях оказались сопоставимыми, однако их положение относительно забоя различалось. В расчётах UDEC пик напряжений располагался ближе к забою, что, вероятно, связано с использованием упругой модели поведения породного массива.

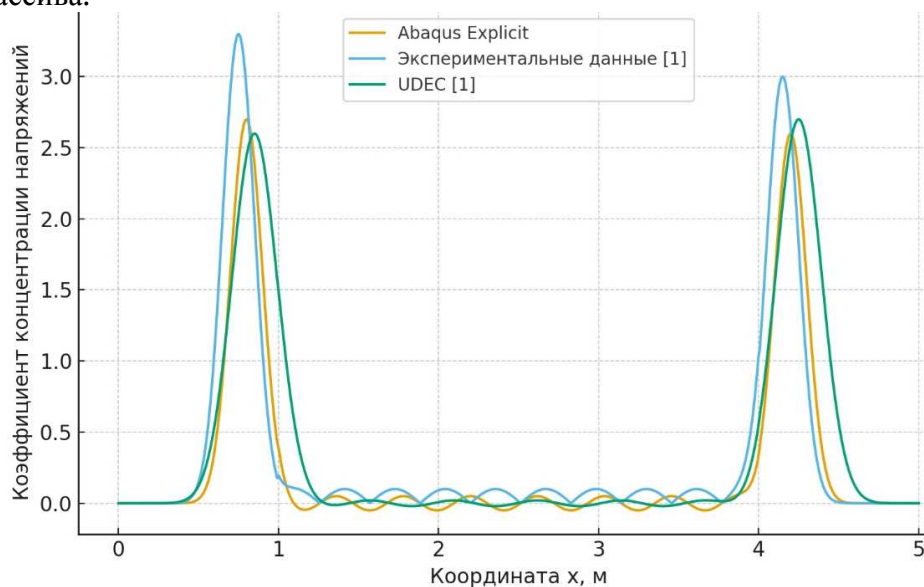


Рис. 4. Сравнение распределения опорного давления по почве угольного пласта

Выводы

Исследование показало, что обрушение кровли при выработке угля длинными очистными забоями связано с развитием трещинообразования в массиве. В процессе разрушения формируется система трещин, которая затрагивает как отдельные пласты, так и их пересечения. Разрушение развивается поэтапно. Сначала наблюдается расслоение пород в массиве, затем следует их внезапное разрушение. Установлено, что форма зоны обрушения приближается к трапециевидной. Её параметры зависят от свойств пород и геометрии трещин. Выявлены основные признаки потери устойчивости. К ним относятся рост пластической деформации и увеличение горизонтального напряжения.

Основными индикаторами приближающейся потери устойчивости являются рост горизонтальных напряжений и усиление пластической деформации. Верификация численных моделей показала, что расчёты в Abaqus Explicit и UDEC демонстрируют устойчивое соответствие данным физического эксперимента. Модель, основанная на методе конечных элементов, также позволила более детально отследить развитие зон обрушения и распределение напряжений в сплошной среде, что важно для оценки риска внезапных обрушений.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило высокую информативность численного моделирования для анализа процессов потери устойчивости кровли при подземной добыче угля. Реализация модели в среде Abaqus Explicit позволила воспроизвести характерные геомеханические процессы, включая формирование раскрытых трещин, перераспределение напряжений и развитие зоны разрушения в массиве.

Сопоставление результатов моделирования с данными физического эксперимента и расчётами в UDEC подтвердило достоверность используемых численных подходов. Это демонстрирует, что численное моделирование может эффективно использоваться как самостоятельный инструмент для прогноза обрушений и оценки устойчивости горных выработок, особенно в условиях ограниченного доступа к натурным данным или невозможности проведения масштабных лабораторных испытаний. Метод оказался особенно полезным в условиях сложной структуры кровли. Полученные зависимости и расчётные данные могут использоваться для прогноза устойчивости и повышения безопасности горных работ.

Список литературы / References

1. Kang H., Lou J., Gao F., Yang J., Li J. A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining // International Journal of Coal Geology. 2018, vol. 188, pp. 25-36. doi.org/10.1016/j.coal.2018.01.013.
2. Kai G., Zhang Q., Liu H., Zhu W. A new numerical procedure for the excavation response in Mohr–Coulomb rock mass exhibiting strain-softening behavior // Frontiers in Earth Science. 2022, vol. 10. doi.org/10.3389/feart.2022.872792.
3. Akutagawa S., Lee J.H., Doba N., Kitagawa T., Konishi S., Matsunaga T. Numerical simulation of a strain softening behavior of a shallow tunnel for a bullet train // Proceedings of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). 2006, pp. 459-467. doi.org/10.1201/NOE0415391245.ch62.
4. Adachi T., Oka F., Kodaka T., Takato J. Deformation and stability analysis of rectangular tunnel in soft rock ground using a strain softening type elasto-plastic model // Modern Tunneling Science and Technology. 2017, pp. 1-12. doi.org/10.1201/9780203746653-92.
5. Rafiei Renani H., Martin C.D. Factor of safety of strain-softening slopes // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 12, iss. 3, pp. 473-483. doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.11.004.
6. Summersgill F.C., Kontoe S., Potts D.M. Stabilisation of excavated slopes in strain-softening materials with piles // Géotechnique. 2017, vol. 67, no. 12, pp. 1050-1066. doi.org/10.1680/jgeot.17.P.096.
7. Wang R., Liu L., Zhu M., Qiu H., Tu B., Qu H., Cui H. Assessing ground stability of a vertical back-filled stope considering creep behaviors of surrounding rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2025, vol. 17, iss. 1, pp. 187-199. doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.010.
8. Wang S., Li C., Tang H., et al. Modeling of strain-softening and analysis of a lining for circular tunnel // Rock and Soil Mechanics. 2010, vol. 31, no. 6, pp. 1832-1840. doi.org/10.16285/j.rsm.2010.06.046.
9. Zhang Q., Huang M., Guo J. A simulation analysis of the stability of tall and collapse-prone stopes // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 617-628. doi.org/10.3390/app142210608.
10. Протосеня А.Г., Веселова А.В. Оценка влияния карстовой полости на устойчивость массива при разработке месторождений Западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №1-1. – С. 33-46. – doi.org/10.25018/0236_1493_2025_11_0_33.
10. Protosenya A.G., Veselova A.V. Assessment of the influence of karst cavities on massif stability during mining operations in Western Yakutia // Mining information and analytical bulletin. 2025, no. 1-1, pp. 33-46. doi.org/10.25018/0236_1493_2025_11_0_33.
11. Trushko V.L., Baeva E.K., Blinov A.A. Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic // Eng. 2025, vol. 6(4), p. 76. doi.org/10.3390/eng6040076.
12. Qiu G., Grabe J. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay // Canadian Geotechnical Journal. 2012, vol. 49, pp. 1393-1407. doi.org/10.1139/t2012-085.
13. Bui H.H., Fukagawa R., Sako K., Ohno S. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2008, vol. 32, iss. 12, pp. 1537-1570. doi.org/10.1002/nag.688.
14. Peng C., Guo X.G., Wu W., Wang Y. Unified modelling of granular media with smoothed particle hydrodynamics // Acta Geotechnica. 2016, vol. 11, pp. 1231-1247. doi.org/10.1007/s11440-016-0496-y.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Карасев Максим Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений	Karasev Maksim Anatolievich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures
Вербило Павел Эдуардович – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений	Verbilo Pavel Eduardovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures
Шишкина Вероника Сергеевна – аспирант shisever@yandex.ru	Shishkina Veronika Sergeevna – postgraduate student

Получена 09.12.2025