

СТАТЬИ

УДК 004.9:622.06

**СИСТЕМЫ САМ В АНАЛИЗЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ВЫЕМКИ ПЛАСТОВ МИНЕРАЛОВ**

**Бейсембаев К.М., Нокина Ж.Н., Асмагамбет Д.К., Храмов А.С., Корнейчук Ю.Ф.**

*НАО «Карагандинский технический университет», Караганда, e-mail: kakim08@mail.ru*

Применение программных систем моделирования горных процессов позволит осуществить управляемую выемку нарушенных участков твердых минералов технологиями лава-камера. В этом случае облегчается контроль состояния забоя и оборудования, создается возможность улучшения прогнозируемости работ при подвигании забоя, уменьшаются потери минералов. Система расчета состояния забоя основана на введении трехфакторного формоизменения горного массива. Это возможно за счет слоистости горных пород и за счет небольшой прочности пород на отрыв. Эти три фактора представлены отслоением слоев пород друг от друга, их поперечным разрушением и скачкообразным изменением модуля деформации пород. Скачки модуля деформации объясняются особой структурой угля, возникшей под действием горного давления. Их иногда представляют аналогиями с системами переходов по типу: порядок – хаос – порядок. Обратная связь машин с горной средой, постоянный контроль параметров системы на всем протяжении горных работ и наличие первоначальных данных о структуре и свойствах пород позволяют выполнить уточнения этих параметров в каждом цикле подвигания работ и обеспечить адаптируемую к среде технологию работ. В этом случае можно рационально использовать ресурсы, повысить безопасность работ. Программные системы могут строиться на возможностях встроенных средств пакетов и за счет использования внешних средств. Их использование позволяет применять комплексы последовательно подключаемых пакетов с оптимизацией решения в зависимости от складывающихся условий.

**Ключевые слова:** слой, программа, пакет, камера-лава, модель, крепь, гидромотор, обратная связь

**CAM SYSTEMS IN THE ANALYSIS OF MINERAL EXTRACTION TECHNOLOGY**

**Beysenbaev K.M., Nokina Zh.N., Asmagambet D.K., Khramov A.S., Korneychuk Yu.F.**

*Karaganda Technical University, Karaganda, e-mail: kakim08@mail.ru*

The use of software systems for modeling mining processes will allow for controlled excavation of disturbed areas of solid minerals using lava-chamber technologies. In this case, it is easier to control the condition of the face and equipment, it creates the possibility of improving the predictability of work when moving the face, and the loss of minerals is reduced. The system for calculating the state of the face is based on the introduction of a three-factor shape change in the rock mass. This is possible due to the layering of rocks, and due to the small strength of the rocks for separation. These three factors are represented by the separation of rock layers from each other, their lateral destruction and abrupt change in the rock deformation modulus. The jumps in the deformation modulus are explained by the special structure of coal, which arose under the influence of rock pressure. They are sometimes presented by analogy with transition systems of the type: order – chaos – order. Feedback of machines with the mining environment, constant monitoring of the system parameters throughout the mining operations and the availability of initial data on the structure and properties of rocks make it possible to refine these parameters in each cycle of work advancement and provide a work technology adaptable to the environment. In this case, resources can be rationally used, and the safety of work can be increased. Software systems can be built on the capabilities of built-in package tools and by using external tools. Their use allows the use of complexes of sequentially connected packages with optimization of the solution depending on the prevailing conditions.

**Keywords:** layer, program, package, camera – lava, model, support, hydraulic motor, feedback

Разрушение пород у выработок определяет горное давление, технологию выемки, нагрузку на крепление и их схемы. Исследования ВНИМИ [1] показали, что первичное сдвигание пород приводит к их расслоению. Это вписывается и в закономерности формирования недр, позволяет выделить более вероятные формоизменения пород, точную методику расчета их состояния, рациональную технологию работ.

Цель работы: обоснование особенностей сдвигания и разрушения пород, применения программных пакетов для создания эффективных технологий выемки в сложных условиях.

Материалы и методы исследования основаны на анализе свойств пород их на-

гружения в очистных забоях, процессов, протекающих при формоизменениях, обоснования и применения конечноэлементных пакетов моделирования САМ для разработки методологии контроля состояния системы с применением обратной связи.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

На рис. 1 представлены особенности проявления формоизменения пород у выработки. Слой 1 под действием веса отходит от кровли при

$$\sigma_y \leq [\sigma_{np}], \quad (1)$$

анализируя это напряжение по линии  $a1' - a1''$ , определяем зону, где такое усло-

вие наступает. Далее рассматривается задача устойчивости левой половины слоя, опирающейся на обрушенные породы или зависающей в виде консоли. Решение задачи теории упругости для консольной кровли основано на теории комплексной переменной или методе конечных элементов МКЭ системы CAM Ansys APDL [2, 3]. Выявляется и местоположение отслоения. Этап формоизменения – поперечное разрушение под действием растягивающего напряжения  $\sigma_x$  может наступить по нижнему контуру в точке  $b1$  (линия  $b1' - b1''$ ). После разрушения в середине пролета, если слой будет оперт на обрушенные породы, возможно деление на четверти, поз. 4. Поперечное разрушение консоли произойдет в точке  $c1$ :

$$\sigma_x \leq [\sigma_{np2}]. \quad (2)$$

Эти особенности определены слоистой структурой и намного меньшим пределом прочности пород на растяжение. В выражениях 1 и 2  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  нормальные напряжения вдоль осей  $Y$  и  $X$ ,  $[\sigma_{np1}]$  и  $[\sigma_{np2}]$  пределы прочности пород на отслоение и растяжение – изгиб. Скачкообразное изменение модуля деформации участков пород Ед учитывается для призабойной зоны, как наиболее нагруженной и объясняется спецификой деформаций угля, под большим давлением ( $p = 5\gamma H$ , где  $\gamma$  плотность;  $H$  высота породного столба). С приближением к забою происходит снижение  $p$ . Скачки Ед связаны с развитием системных трещин, когда способность участков к деформациям без видимого разрушения резко возрастает [4]. Эксперименты в лабораторных условиях это подтверждают, а опорное давление, рассчитанное по этим методикам, совпадает с реальным. Построение на этой основе механизма влияния распора крепи на породы также подтверждено [5, 6]. Ширина зоны дезинтеграции пласта определяется мощностью пласта  $m$ , давлением  $p$ , расстоянием от поверхности забоя  $x$  и коэффициентом сцепления пласта с почвой  $ftp$  и кровлей  $ftk$ :

$$b \sim F(m, p, ftp, ftk, x). \quad (3)$$

Разработчики этого опираются и на особенности расчета переходных процессов на молекулярном уровне типа: порядок – хаос – порядок, а во ВНИМИ как о системе устойчивость – неустойчивость, уплотнение – разуплотнение, в том числе основываясь на проскальзывании одних молекулярных структур относительно других с изменением расстояний между структурами и сил их притяжения. Для трёх возможных формоизменений создается приоритетный механизм выбора на текущий момент наиболее вероятного. Он позволяет рассмо-

треть возможности протекания формоизменений в модели. Из расчётов следует, что их зоны могут циклически переходить в разные области массива. Так, массив разрушается постепенно, протекая в разных зонах, но затем разрушения сосредотачиваются в наиболее ожидаемой, где происходит глобальное разрушение, за счет объединения зон. Это подтверждается и исследованиями сейсмоакустического излучения от предельно нагруженного массива. В то же время для мелкослоистых пород фиксация таких разрушений позволяет сравнивать эти процессы с потерей прочности массивом с течением времени. Если исходить из непрерывного развития стохастических микроразрушений в массиве со средним временем одного из них  $\Delta t$ , то магистральное разрушение произойдёт через время

$$T = \sum_{k=0}^n \Delta t_m + tv. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta t_m$  – среднее время разрушения микрослоя;  $tv$  – среднее время выстоя очередного слоя, пока в нем не начнется разрушение;  $n$  – количество микроразрушений.

К недостаткам модели [2, 6] относили принятие длины разрушения, равное элементу разбиения расчётной схемы. Таким элементом может быть сам конечный элемент. Выбор приоритета не останавливает процесс, который рассматривается как дискретный позволяет ввести обновленную схему расчета с возможно новым формоизменением. То есть ситуация в первой зоне «замораживается» до тех пор, пока для неё не будет достигнут очередной максимальный приоритет, и ранее отставленное формоизменение будет продолжено. Размер элемента должен не превышать длину возможной трещины, время распространения которой не превышает время нового изменения состояния массива (расчетной) схемы. Массив у лавы может быть представлен твердотельным суперэлементом, который включает пласт, секцию крепи, комплекс пород почвы, кровли и обрушения шириной до 1,5 м. Далее он копируется необходимое число раз для получения всей лавы [2]. Используя технологию суперэлементов, можно построить забой разной длины, с промежуточными вставками, имитирующими межсекционное пространство, включая и разделение забоя поперечными разломами. Имея выработки (транспортный и вентиляционный штрек) слева и справа, достраиваем модель, используя суперэлементы сопряжений. С их внешних сторон можно строить обрушенное пространство, целик, или нетронутый горный массив (рис. 2).

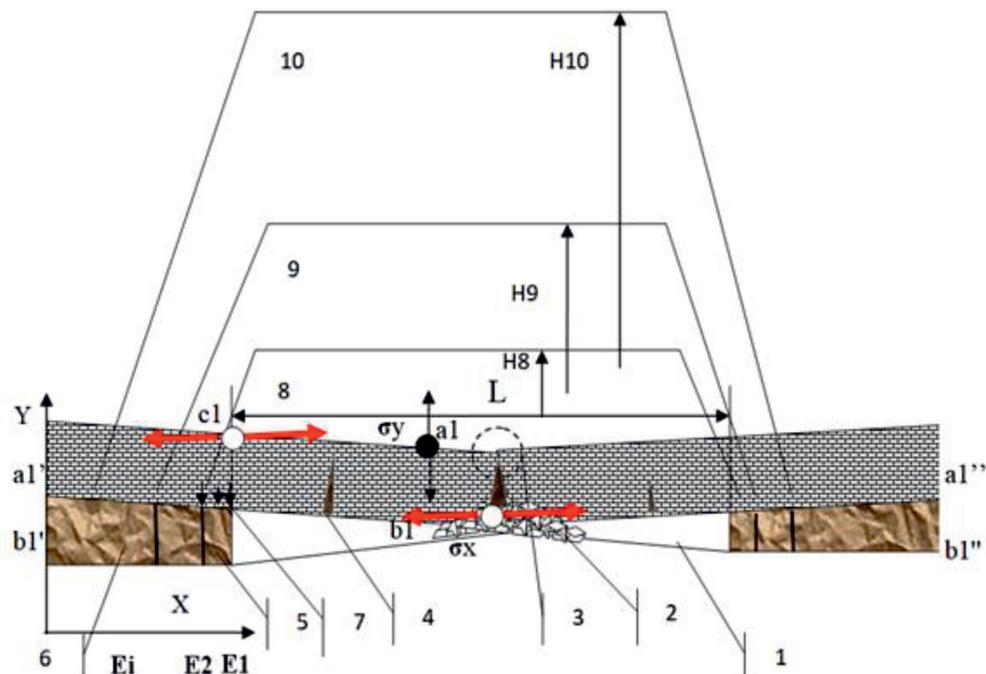


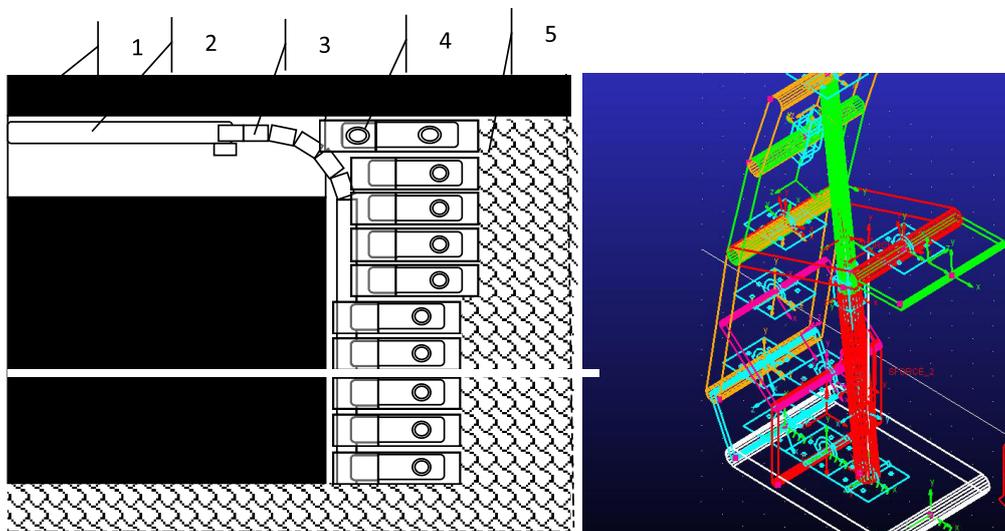
Рис. 1. Формирование трещин у лавы: 1 – отслоившийся слой, 2 – поперечная трещина, 3,  $a1$  – зона анализа напряжений  $\sigma_y$  на растяжение,  $b1$ ,  $c1$  – зоны анализа напряжений  $\sigma_x$  на растяжение – изгиб,  $a1' - a1''$ ,  $b1' - b1''$  – линии анализа напряжений в программе, 4 – разлом в левой части, 5 – зоны дезинтеграции пласта, 6 – зона максимального опорного давления, 7 – давление  $P$ , 8, 9, 10 – зоны сводообразования,  $H8$ ,  $H9$ ,  $H10$  – высоты сводов

Не вызывает затруднений и моделирование разворотов короткой лавы-камеры, когда зона разворота моделируется вырезанием цилиндра соответствующего радиуса, с заполнением полости обрушенными породами. Контактные условия сопряжения суперэлементов могут быть различными. Если трещины поперёк лавы не развиты, то можно склеить объекты, в противном случае ввести между ними контакт-элементы и обеспечить возможность совместной деформации поверхностей со смещением с заданным коэффициентом трения. Решение таких задач сопряжено с большими трудностями из-за множества используемых элементов и данных, снижающих его точность. Невозможно исключить и случайные ошибки, в том числе и за счёт длительности вычислений. Следовательно, необходимы мероприятия, по контролю решения включая и переход к испытанию полученной программы как сложной системы [6, 7]. Сечение сопряжений лав часто уменьшается горным давлением, что ухудшает их вентиляцию. Поэтому следует получить модели надежного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в таких зонах, с учетом возможного расположения здесь зон нарушений. Реализация такой програм-

мы должна строиться на основе 3D решений, и особенно для лав-камер, где влияют краевые эффекты. Поэтому при имитации подвигания забоя, соответствующим изменением координаты  $X$  забоя автоматически перемещается и противоположная стенка модели, и вся структура пластовой дезинтеграции, которая заново рассчитывается при новом положении с учетом выражения (3). Реализация формоизменений в автоматизированном варианте для плоских решений частично представлена в [6]. В этом случае формоизменения накапливались в базе данных, обрабатывались по специальным алгоритмам (метод «Пылесоса»), и после преобразований матриц создавали новую расчетную схему, существующую в одном цикле, поскольку его результат вызывал очередное формоизменение и необходимость использования следующей схемы. Понятно, что в таких условиях расчеты не остановятся и равновесного состояния не будет достигнуто, поэтому все результаты циклового анализа сбрасываются в файлы данных, из которых строятся «моментальные фотографии» НДС. Для МКЭ такие решения с полной автоматизацией получить сложнее, что определяется: необходимостью проверки на соответствие встроенного

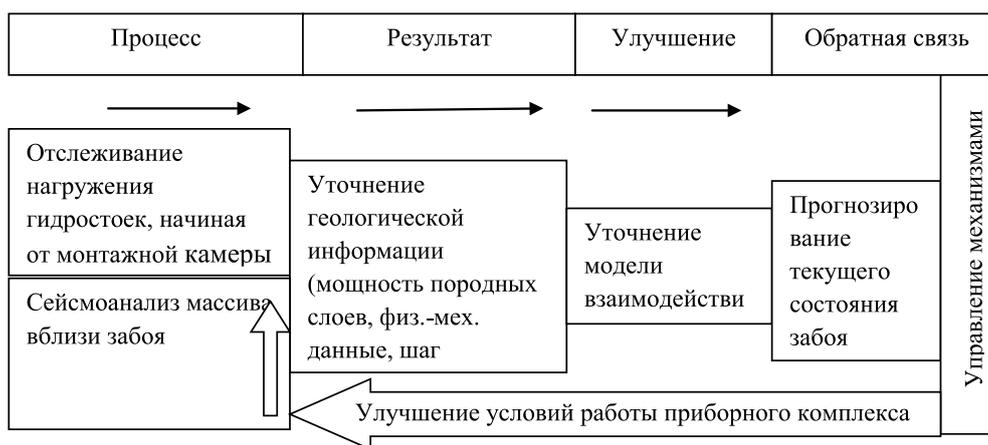
языка программирования А [6, 7] или применением внешних систем программирования, управляющих запусками пакетов и накоплением данных в создаваемых файлах для графопостроения результатов текущего положения забоя. Внешнее управление же пакетом возможно на основе языка С, и в этом случае значение пакета в исследованиях уменьшается так как в систему можно включать специальные решатели МКЭ извне, используя из Ansys графопостроители. Критические точки, где происходят разрушения, расположены в особых зонах, прогноз которых несложен, что при необходимости позволяет сократить время про-

смотра массива модели с помощью операторов циклов. При этом обязательны проверки работы этих операторов с учетом [6]. Наличие программного обеспечения геомеханики процессы, которой особенно важны для оптимизации выемочных технологий, позволяют развивать методы приспособления к программе блоков моделей роботизированной крепи, буровых устройств, поворотных конвейеров и систем их автоматизации при отработке пластов средней мощности и мощных. Можно рассмотреть и вопросы расчета устройств для проходки неглубоких скважин для теплосетей и других промышленных нужд (рис. 3).



а)

б)



в)

Рис. 2. Компактное размещение оборудования в самой проблемной зоне лавы – на сопряжении (а), использование пакета Adams (б) для сложных конструкций, и основы обратной связи (в): 1 – целик, 2 – поворотный конвейер, 3 – секция крепи типа ОКП 70, 4 – обрушенные породы

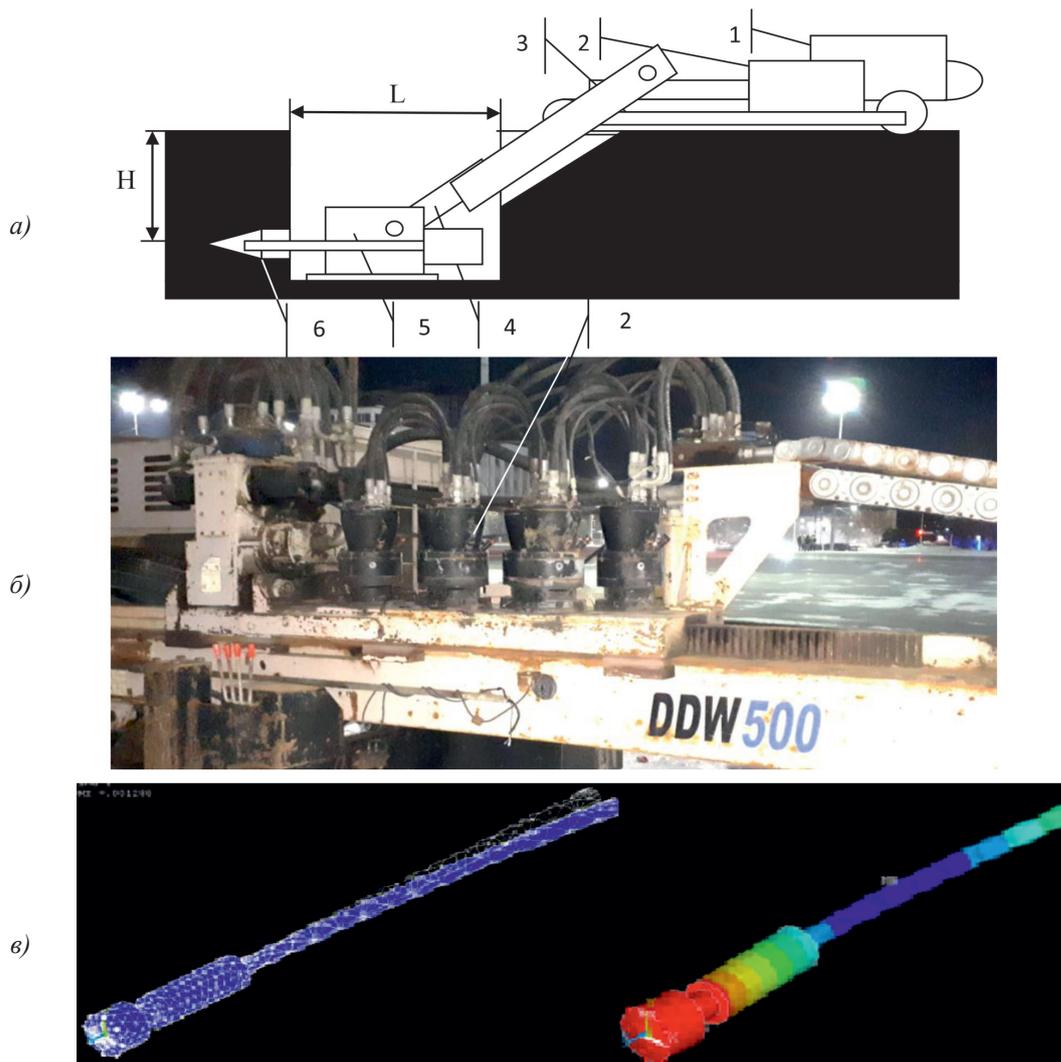


Рис. 3. Создание скважин через препятствия на поверхности:  
 1, 2 – электро- и гидропривод с группой гидромоторов, 3 – гусеничный ход,  
 4 – коромысло, 5 – гидропривод, 6 – буровое устройство

Здесь расчет буровых устройств также строится на Ansys, а задачи динамики – в пакете Adams. В конструкции оптимально использован гидромеханический привод на основе множества гидромоторов и зубчато-реечной передачи для подачи и вращения буровой головки, компактного размещения оборудования и гидробура на поверхности и в канаве, для складывания всех устройств на гусеничной тележке после завершения работ. Эти моменты можно задействовать при камерной выемке малых месторождений и, в частности, при наличии пластов, выходящих на поверхность. На рис. 2 представлена камера-лава с поворотным конвейером, работающим по обычному принципу лавного, однако сопряжение лавы разгруже-

но от приводов и их часть вынесена в безопасные условия – на штрек. В отличие от конвейеров со стабильно размещенным поворотным звеном, возможность разворачивать став в любой зоне позволяет менять и длину короткого забоя. На Adams [8, 9] спроектированы сложные конструкции, что подтвердило возможность совмещения работы исполнительных органов (ИО), установленных на секциях для увеличения вынимаемой мощности пласта с двухрядной схемой поддержания кровли. Раздвижность секций не ограничена новым узлом при уменьшении в 1,5 раза металлоемкости крепи, по сравнению с крепью разработанной в КНР для пластов мощностью до 6 м. Близкие схемы таких ИО впервые реализо-

ваны в Кузбассе (агрегаты типа АЩ и др.). Далее представлена схема обратной связи, обеспечивающая работу в режиме постоянного контроля и прогнозирования состояния забоя на каждом этапе подвигания. Можно утверждать, что такая методология позволит создать эффективные условия для работы приборных комплексов в технологиях типа [10] и резко увеличить точность прогнозирования.

### Заключение

Программные системы для расчета геомеханических процессов в очистном забое лавы-камеры строятся на основе САМ. Современные пакеты Ansys Adams позволяют создавать модели движущейся лавы-камеры и способны на основе МКЭ и линеаризации уравнений динамики учитывать основные процессы сдвига и обрушения пород, работы крепи и бурового оборудования с учетом достаточно точного расчета НДС очистного забоя под влиянием оборудования, крепления и подвигания. В режиме обратной связи создается возможность работы с постоянным уточнением состояния массива и адаптации технологии и горной среды.

В работе творческое участие принимал В.А. Когай.

### Список литературы

1. Кузнецов С.Т., Семенов Ю.А., Шишкин В.П., Мукушев М.М. Разупрочнение труднообрушаемых кровель угольных пластов. М.: Недра, 1987. 200 с.
2. Бейсембаев К.М., Малыбаев Н.С., Тутанов С.К., Шманов М.Н. Разработка модели лавы для системы управления механизированной крепью с обратной связью // Горный журнал. 2019. № 8. С. 38–43.
3. Gaofeng Song, Yoginder P. Chugh, Jiachen Wang. A numerical modelling study of longwall face stability in mining thick coal seams in China. *Int. J. of Mining and Mineral Engineering*. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 35–55.
4. Сапожников В.Т. Предельно-напряжённое состояние угольного пласта // ФТПРПИ. 1988. № 3. С. 56–60.
5. Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю.А. Зональная дезинтеграция вокруг очистных выработок // ФТПРПИ. 2015. № 2. С. 46–52.
6. Бейсембаев К.М., Жолдыбаева Г.С., Жунусбекова Г.Ж., Мендикенов К.К., Окимбаева А.Е., Шманов М.Н. Модели взаимодействия машин и пород в недрах // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 11–2 (42). С. 13–17.
7. Ташевский А.Г. Верификация результатов испытаний сложных технических систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования 2013. № 2(171). С. 203–210.
8. Talli A.L., Kotturshettar B.B. Forward Kinematic Analysis, Simulation & Workspace Tracing of Anthropomorphic Robot Manipulator by Using MSC. ADAMS. 2015. Vol. 4. No. 1. P. 18462–18468.
9. Hango Mahalingam, Chandramouli Padmanabhan. Planar multibody dynamics of a tracked Vehicle using Imaginary Wheel model for tracks. *Defence Science Journal*. 2017. Vol. 67. No. 4. P. 460–464.
10. Ankush Galav S.K., Sahoo G.S.P. Singh, Sanjay K. Sharma. Study of Strata Behaviour in a Contiguous Seam Depilating Working. *Int. Conf. on Deep Excavation. Energy Resources and Production, IIT Kharagpur, India*. 2017. Paper No. 136.