

О ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ НА ЭЛЬГИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Наталья Анатольевна Немова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Владимир Леонидович Гаврилов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, e-mail: gvlugors@mail.ru

На примере Эльгинского угольного месторождения показана актуальность построения цифровых моделей геологических объектов для управления геомеханическим состоянием бортов разреза. Представлены физико-механические свойства вскрышных пород. Приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива. Установлены направления общих смещений напряжений и зоны максимальных смещений борта разреза с построением карт их распределения. Показано, что растяжениям более подвержены нижние уступы.

Ключевые слова: месторождение, разрез, горный массив, устойчивость, цифровая модель, напряженно-деформированное состояние, напряжения.

GEOMECHANICAL MODELING IN MINING AT THE ELGINSKY DEPOSIT

Natalya A. Nemova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Open-Pit Mining Laboratory, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Vladimir L. Gavrilov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Open-Pit Mining Laboratory, e-mail: gvlugors@mail.ru

Using the Elginsky coal deposit as an example, the relevance of building digital models of geological objects to control the geomechanical condition of open-pit walls is shown. Physico-mechanical properties of overburden rocks are given. The results of numerical simulation of stress-strain state of the rock mass are presented. The directions of general stress displacements and zones of maximum displacements of the open-pit wall are determined and the maps of their distribution are compiled. It is shown that lower benches are more susceptible to tension.

Key words: deposit, open-pit mine, rock mass, stability, digital model, stress-strain state, stresses.

Введение

Усложнение условий и порядка освоения угольных месторождений открытым способом ведет к постоянному росту требований к безопасному ведению

горных работ. Важными направлениями при решении этой актуальной научно-практической проблемы является своевременная и качественная оценка геомеханического состояния откосов бортов и уступов разрезов на основе моделей, объединяющих геологическую, геомеханическую и геотехнологическую информацию. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождений на основе достоверных, представительных и оперативных данных позволяет решать комплекс задач, в числе которых: оценка влияния трещиноватости горного массива на его устойчивость; прогноз напряженно-деформированного состояния геологической среды; изменение этого состояния в ходе отработки месторождения на всех стадиях жизненного цикла проекта; выбор рациональных параметров построения технологического пространства; определение системы организационных и технологических методов управления геомеханическими и геодинамическими процессами в горном массиве для обеспечения эффективного и безопасного освоения ресурсов недр [1–6].

При расчетах широко применяются различные методы создания виртуальных моделей месторождений, учитывающих напряженно-деформированное состояние массива горных пород, изменяющееся во времени под воздействием факторов природной среды и инженерной деятельности человека. Геологические модели месторождений служат основой для создания их геодинамических моделей, которые поэтапно адаптируют к изменяющимся во времени и пространстве условиям разработки, с их использованием рассчитывают прогнозные варианты, выбирают оптимальные сценарии разработки. Целями при этом являются детальное отражение неоднородностей полезного ископаемого и основных геологических параметров угольных пластов, оперативное предоставление пользователям информации о характеристиках залежи. Моделирование позволяет лицам, принимающим решения, более полно оценить геологию разрабатываемой или планируемой к освоению залежи и точнее предсказать ее поведение при различных сценариях разработки.

На геомеханические процессы и характер распределения действующих напряжений в массиве влияют множество факторов, включая: физико-механические свойства (ФМС) горных пород, их структурную целостность, уровень нарушенности массива, его трещиноватость. Трещиноватость влияет на прочность и устойчивость горных пород; деформируемость, характер проявления деформаций и их величину; водоносность, влагоемкость, водогазопроницаемость; глубину проникновения агентов выветривания и интенсивность развития процессов выветривания; температурный режим пород; скорость распространения сейсмических волн и сейсмостойкость пород; крепость, трудность разработки и с другой – определяет направления движения забоев и т.д. [3–5].

К основным ФМС горных пород, используемым в качестве исходных данных при решении геомеханических задач, относятся деформационные и прочностные свойства горных пород, определяющие характер и условия их трансформации и разрушения под нагрузкой. К деформационным характеристикам

относятся модули упругости и коэффициенты Пуассона (хотя, последние оказывают несущественное влияние на деформационные процессы). Прочностные характеристики, подлежащие оценке, определяются используемой при моделировании теорией прочности; для теории прочности Кулона-Мора, получившей наибольшее распространение в механике горных пород, такими характеристиками являются сцепление и угол внутреннего трения. В качестве исходных данных для моделирования выступают вертикальное напряжение, минимальное и максимальное горизонтальное напряжение; горизонтальное напряжение, поровое давление, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения [4–8].

Для своевременной и надежной оценки устойчивости горных пород уступов и бортов, когда при принятии решений внимание, как правило, акцентируется на учете рисков возникновения наихудшей (предельной) ситуации, необходимо: получение более современной, постоянно обновляемой и дополненной исходной информации о ФМС нарушенного (трещиноватого) массива пород с характеристиками ее деформирования под нагрузкой (испытания образцов пород в лабораторных и натуральных условиях), о параметрах действующих полей напряжений для конкретных участков месторождения, имеющих геологические и технологические различия; построение и применение эмпирических, опытных и аналитических зависимостей для установления степени влияния природной и техногенной нарушенности горных пород и полезного ископаемого.

Методы, объект и предмет исследования

Для прогноза деформаций, сдвижений и разрушений горных пород месторождений с учетом полей напряжений часто применяются численные методы для моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Их комплексирование с натурными методами прогноза позволяет осуществить выбор геомеханически обоснованных более безопасных технических решений [9–11]. Исследование НДС массива горных пород в настоящее время возможно за счет рационального сочетания аналитического и численного моделирования.

Объектом исследования является Эльгинское угольное месторождение, а предметом – геомеханическое моделирование НДС массива горных пород и оценка его устойчивости.

Краткая характеристика Эльгинского месторождения

Эльгинское месторождение коксующихся и энергетических углей, расположенное в юго-восточной части Якутии, входит в число самых крупных в мире. Общие запасы и ресурсы превышают 3 млрд. т. Коксующийся уголь характеризуется в среднем высокими потребительскими свойствами: хорошая спекаемость, пластичность и текучесть при нагревании, низкое содержание серы, фосфора. По выходам пластов на поверхность осуществляется добыча относя-

щихся к энергетическим окисленным углей с высокой теплотворной способностью и низким содержанием вредных примесей. Оба вида углей имеют высокую зольность, трудную и очень трудную обогатимость.

Залежь представляет пологую брахисинклиналь и характеризуется среднегорным рельефом с плоскими и узкими водоразделами, расчлененными крутыми глубоко врезанными долинами водотоков. Породы угленасыщенной зоны, представленной свитами мощных (до 15 метров), средних и тонких х пластов, имеют пологое падение (2-5° на севере и 8-10° на юге). На южном борту в зоне шириной около 1 км вструктураместорождения осложнена мелкой складчатостью с углами падения до 30-50°. Многолетнемерзлые породы на площади месторождения мощность от 30-40 м до 200 м и более пользуются повсеместным развитием. Имеется ряд крупно- и малоамплитудных разрывных нарушений (сбросы, взбросы, надвиги), безамплитудных зон дробления пород и зон повышенной трещиноватости вблизи разрывных нарушений. Практика работы в регионе показывает, что на площади месторождения возможно выявление и других нарушений, включая мало- и безамплитудные, которые не определены существующей разведочной сетью и практикой горных работ [12, 13].

В литологическом разрезе выделяется несколько близких по ФМС геологотехнологических комплексов пород: четвертичные отложения; осадочные и метаморфизованные породы с содержанием вулканогенного материала до 10 %, от 10 до 40 %; содержащими вулканогенно-обломочный материал в количестве 40-50% и более [14].

Гидрологические условия месторождения оказывают непосредственное влияние на ФМС горных пород. Значимыми являются процессы снижения прочности горных пород при насыщении их водой или агрессивными растворами и из-за размягчения и растворения цементирующих веществ [15]. Влага оказывает также разрушающее действие из-за влияния расклинивающего давления ее тонких пленок. Средние значения коэффициента размягчения изменяются от 0,58 у песчаников крупнозернистых до 0,66 у конгломератов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика водоустойчивости пород

Литотип	Значение коэффициента размягчения		
	Алевриты	10	0,66
Песчаники:			
Мелкозернистые	21	0,62	0,04
Среднезернистые	8	0,65	0,04
Крупнозернистые	7	0,58	0,04
Конгломераты	8	0,66	0,07
Итого:	54	0,63	0,022

Принятые проектом решения по вскрытию и управлению состоянием массива

В 2011 г. с вводом в эксплуатацию первоочередного участка начался промышленный этап освоения месторождения – одного из приоритетных для экономики Дальневосточного региона. По данным Министерства промышленности и геологии РС (Я) в 2019 г. было добыто 4,3 млн. т угля. Это намного меньше тех объемов (20,0 млн. т), на которые компания «Эльгауголь» планировала выйти к 2020 г. Ранее проектной документацией предусматривалось поэтапное увеличение мощностей по добыче и обогащению угля с выходом на по разным сценариям на добычу в 27-35 млн.т/год.

Урегулирование в 2019-2020 гг. финансовых споров с «Эльгауголь» и смена основных собственников предполагают интенсивное наращивание в рамках проекта мощностей по добыче и обогащению угля в соответствии с принятыми геотехнологическими и организационно-экономическими решениями.

Схема вскрытия месторождения с применением автомобильного транспорта на вывозке угля и вскрышных пород, согласно решениям «Мечел-инжиниринг», определена на основании анализа его горно-геологических условий и рельефа поверхности, принятого порядка отработки, местоположения отвалов вскрышных пород с учетом организации водоохраных зон основных рек и ручьев, размещения промплощадки с углеперерабатывающим комплексом. Формирование схемы вскрытия нагорной части разреза выполнено с учетом следующих подходов: рабочие уступы вскрываются заездами с рельефа поверхности; по склонам от подножия к вершинам сопок предусматривается строительство основных технологических автодорог с системой наклонных и горизонтальных заездов на рабочие уступы; на крутонаклонных участках поверхности заезды на концентрационные горизонты формируются по возможностям рельефа через 30-60 м по высоте; связь промежуточных уступов с концентрационными осуществляется скользящими съездами в рабочей зоне, дороги и заезды устраиваются в полутраншеях, проезжая часть располагается в коренных породах; для вскрытия нагорной части участка по торцевым склонам (северо-западному и восточному) запланировано строительство двух технологических автодорог с системой заездов на рабочие уступы. Вскрытие нижних рабочих горизонтов участка осуществляется общими фланговыми траншеями внутреннего заложения.

Сибирским филиалом ВНИМИ на основании проведенных исследований (2009 г.) обоснованы параметры устойчивости бортов, уступов и отвалов при отработке запасов Эльгинского месторождения угля открытым способом, имеющих нормативную устойчивость, расчет которой проведен по схемам ВНИМИ методом алгебраического и векторного сложения сил (многоугольника сил). Эти параметры, как показывает анализ (таблица 2), зависят от достаточно большого количества факторов. В числе наиболее влияющих: нахождение горного массива в многолетнемерзлом или талом состоянии, углы падения слоев либо в выра-

ботку, либо в массив, глубина разреза. С увеличением угла падения слоев в выработку и глубины разреза угол наклона борта уменьшается.

Таблица 2

Параметры бортов и их элементов на разрезе "Эльгинский" на конечном контуре со сроком стояния более 10 лет в зонах многолетнемерзлых и непромерзаемых пород

Угол падения слоев	Углы наклона борта (град.) при его высоте (м)								
	30	50	70	90	110	150	190	230	250
При падении слоев в выработку многолетнемерзлых пород									
0°-3°	42/55	34/36	22,5/29	21/26	20/23,5	19,5/21	18,5/19	17/17,5	16/16
5°-7°	39/51	29,5/30	16/18	11/13,5	9,5/10	7/7,5	6/6,5	4,5/4,5	4/4
10°-12°	35/50	23,5/26	12/16,5	10,5/14	10/11	9,5/10	9/9,5	8/9	8/8,5
15°-17°	34/48	16,5/22	14,5/15	13/14,5	13/14	12,5/13,5	12,5/13	11,5/12,5	10,5/11
При падении слоев в массив многолетнемерзлых пород									
	52,5/65	47/61	34,5/41	28/34,5	27,5/31	26,5/28	26,5/27	26/26,5	25,5/26
При падении слоев в выработку непромерзаемых пород									
0°-3°	55	36	29	26	23,5	21	19	17,5	16
5°-7°	51	30	18	13,5	10	7,5	6,5	4,5	4
10°-12°	50	26	16,5	14	11	10	9,5	9	8,5
15°-17°	48	22	15	14,5	14	13,5	13	12,5	11
При падении слоев в массив непромерзаемых пород									
	65	61	41	34,5	31	28	27	26,5	26

Специалистами института даны рекомендации по обеспечению устойчивости массива с учетом состояния, в котором находится массив. Бермы безопасности должны закладываться на границах между подвергающимися периодическому оттаиванию породами и многолетнемерзлыми породами, а также в районах перехода мерзлых пород в породы, имеющие температуру выше нуля. В летний период при оттаивании многолетнемерзлых и льдистых пород ширина берм при высоте уступа 30 м должна быть не менее 10 м. В зимний период ширина берм может ограничиваться техническими параметрами оборудования, используемого для их механизированной очистки. Необходимо создавать теплоизоляционный слой при стоянии уступов сложенных из многолетнемерзлых и льдистых пород без обновления их откосов более 3-5 лет. Целесообразно применение контурного взрывания для снижения влияния взрывов на устойчивое состояние откосов при подготовке пород к выемке посредством БВР.

Горно-технологическое моделирование на основе цифровых моделей

Применение методов численного моделирования, широко используемых в геомеханике при горно-технологическом моделировании, позволяет дать более точную оценку параметрам устойчивости массива горных пород, на основе которой возможна разработка и реализация мероприятий по предупреждению

развития деформаций в любой точке горного массива и управлению НДС, а также изучить его поведение при многочисленных циклах замерзания-оттаивания.

Базовым элементом при выполнении такой работы является цифровая геологическая модель месторождения, позволяющая использовать ее при моделировании геомеханического состояния горного массива для обоснования рациональных схем вскрытия, повышения экономической эффективности разработки месторождения без ухудшения условий безопасного ведения горных работ с учетом основных горно-геологических и горно-технологических параметров. Модель, построенная с использованием первичной геолого-маркшейдерской информации посредством геоинформационных систем MineFrame, Micromine, ArcGIS [16, 17], представляет собой модель, несущую информацию о геометрии пластов и вмещающих пород, ФМС и качестве угля.

На следующем этапе построена геомеханическая модель по профильной линии III-III методом численного моделирования и выполнены расчеты коэффициента запаса устойчивости массива горных пород при последовательной отработке запасов месторождения. Основой для расчетов были ФМС горных пород, диапазон значений которых представлен на рис. 1, 2.

Основными прочностными характеристиками сопротивления грунтов сдвигу в соответствии с законом Кулона-Мора являются сцепление и угол внутреннего трения. Диапазон значений углов внутреннего трения (рис. 1) при оттаивании уменьшается, а значения сцеплений в образце (рис. 2) незначительно, но уменьшаются при оттаивании.

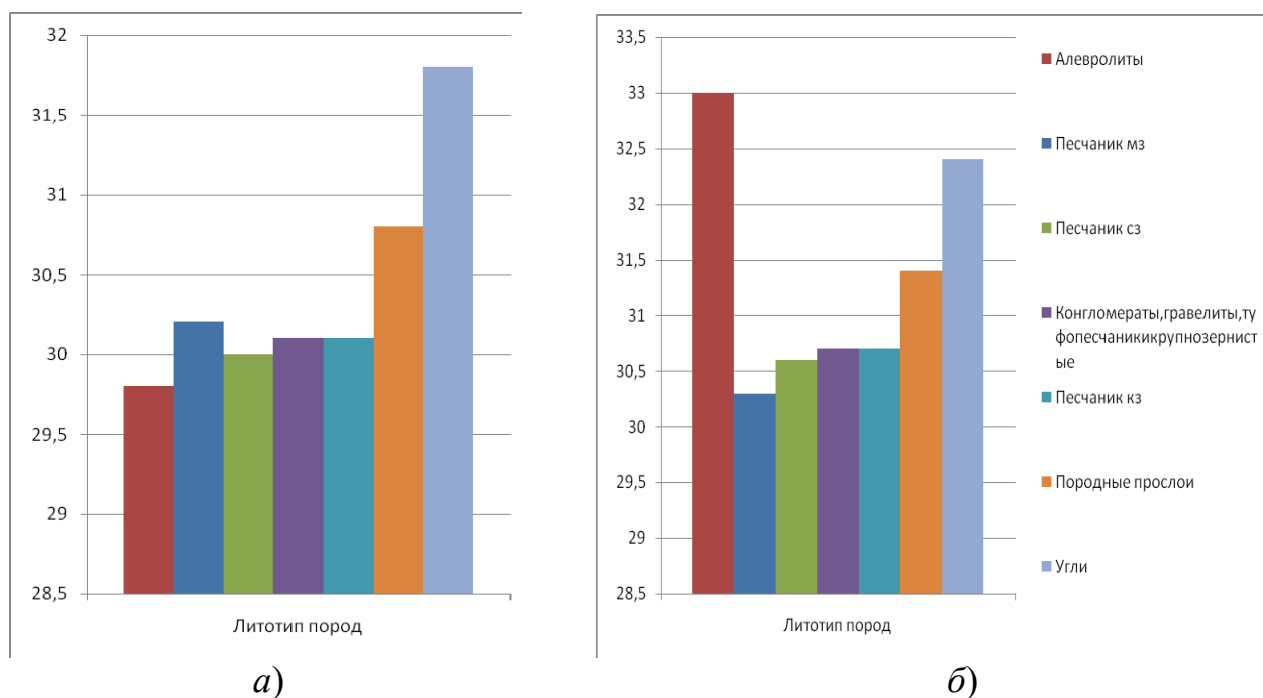


Рис. 1. Диапазон значений углов внутреннего трения (град) литотипов пород при оттаивании (a) и в мерзлом состоянии (б)

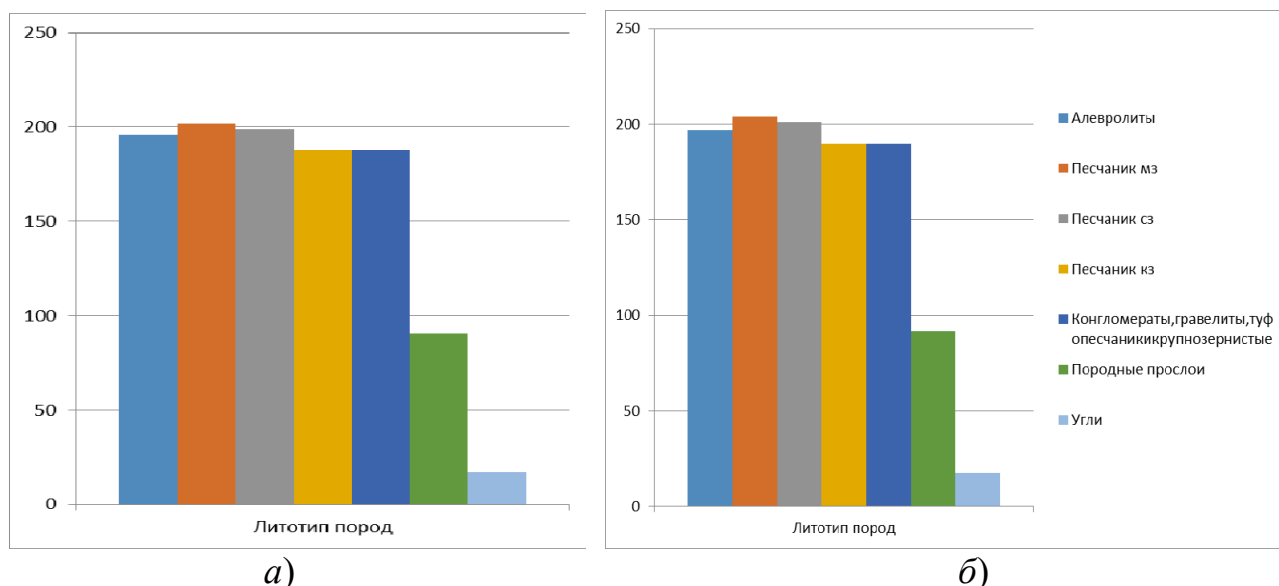


Рис. 2. Диапазон значений сцеплений в образце (кг/см^2) по литотипам пород при оттаивании (а) и в в мерзлом состоянии (б)

Такое изменение гидродинамического режима ведет за собой изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород вблизи горных выработок, а также изменение прочности пород в процессе разработки месторождения [18–20]. При прогнозировании устойчивости откоса задача сводилась к отысканию в массиве наиболее слабой поверхности скольжения и определению по ней коэффициента запаса устойчивости (КЗУ). Использование различных методов по определению коэффициента запаса устойчивости бортов и уступов разрезов позволяет спрогнозировать вероятность отказа модели массива, а также применить методы поиска для определения местоположения критической поверхности скольжения для данного откоса.

Далее было нанесение на геологические разрезы контура борта разреза со следующими параметрами: глубина разреза более 100 м, угол откоса борта разреза 24° и геологическое строение прибортового массива по данным разведочных скважин. По профильному разрезу выполнены расчеты по поверхностям скольжения.

Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния (рис. 3) показал, что КЗУ прибортового массива при реализации принятых проектом решений равен 4.66 при нормативном 1,5.

Геомеханическое моделирование численными методами показало, что при реализации решений принятых проектом модель является устойчивой.

Анализ направлений общих смещений напряжений массива горных пород показал, что зоны максимальных смещений напряжений сконцентрированы в области влияния нижних уступов (рис. 4). Максимальные значения смещений растягивающих напряжений достигают 0,061 м при значении критического фактора снижения напряжений (SRF) равном 4,91 (рис. 4).

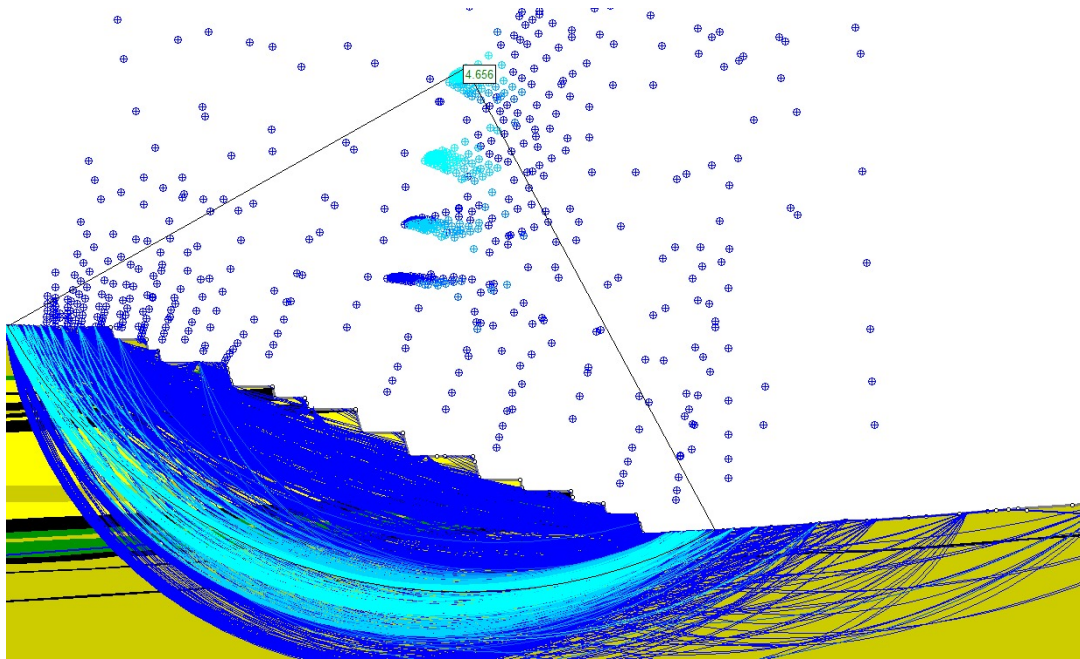


Рис. 3. Геомеханическое моделирование массива горных пород с коэффициентом запаса устойчивости

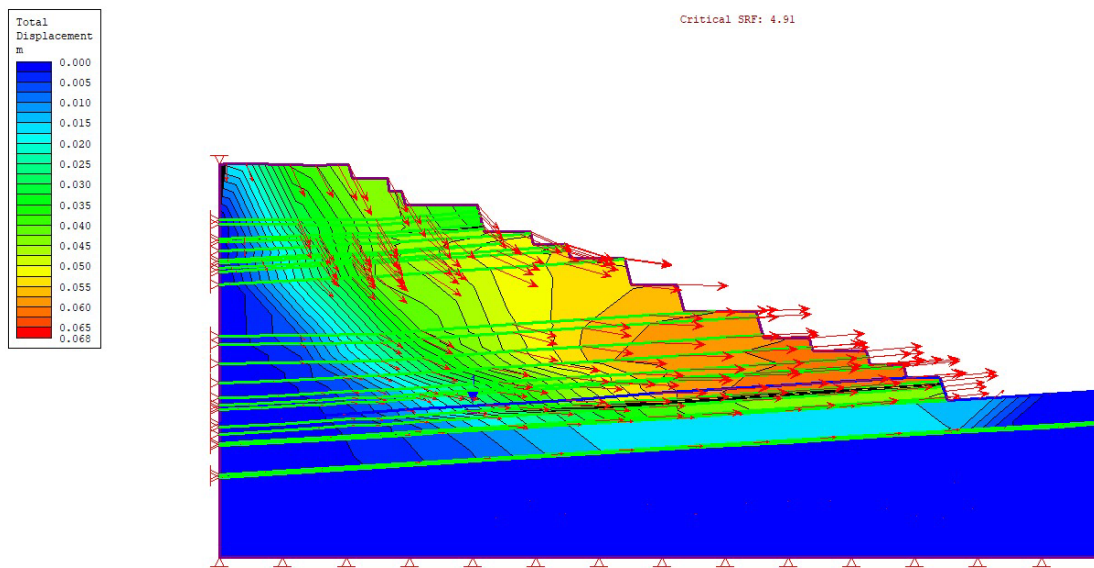


Рис. 4. Карта изохром распределений смещений массива исследуемой модели

На рис. 5 показана зависимость фактора снижения напряжений (Strength Reduction Factor, SRF) от значения отношения прочности на одноосное сжатие (σ_c) к максимальному главному напряжению (σ_1), возникающему вокруг выработки. SRF – параметр, связанный с напряженным состоянием горного массива, по мере его увеличения прочностные свойства массива будут уменьшаться. В условиях наличия вертикальных нагрузок и горизонтальных тектонических

напряжений в упруго-пластичных массивах SRF изменялся от 1 до 5. Анализ показывает, что ослабление массива произойдет, когда фактор снижения напряжений достигнет показателя равного 4.91 при максимуме $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.061$ м.

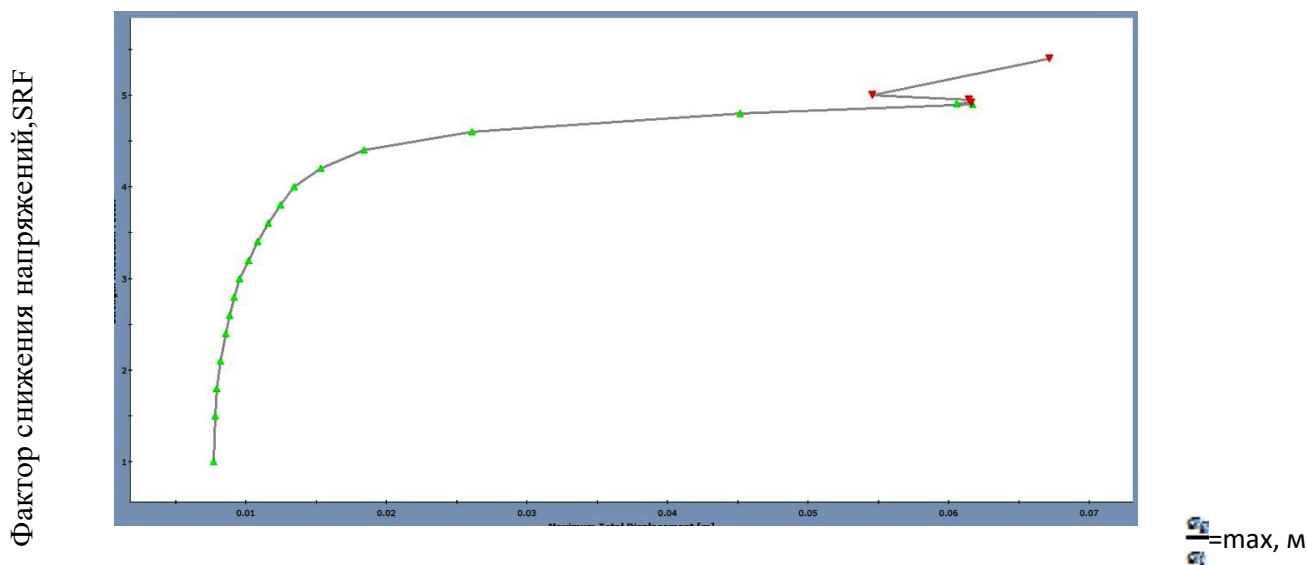


Рис. 5. Снижение прочности массива горных пород

Повышение надежности результатов исследований НДС массива горных пород возможно за счет рационального сочетания аналитического и численного моделирования. Аналитический метод определения КЗУ и обоснование параметров устойчивости бортов, уступов и отвалов при отработке запасов угля открытым способом на Эльгинском каменноугольном месторождении, является более трудоемким. Современные численные методы моделирования характера и условий изменения напряженно-деформированного состояния массива позволяют создавать трехмерные модели горного массива и прогнозировать устойчивость бортов и уступов. Совместное применение их с натурными методами позволяет уточнить и проверить (верифицировать) адекватность расчетных моделей, осуществить более обоснованный с позиций геомеханики выбор технических и технологических решений, корректировать результаты исследований с внесением при необходимости соответствующих изменений. Использование полученных данных о НДС массива горных пород разными методами позволит выполнить качественное сопровождение разработок, обеспечивающих безопасность и надежность геотехнологий.

Выводы

1. В результате геомеханического моделирования выяснили, что отказ модели произойдет при достижении критического фактора снижения напряжений SRF 4,91 при максимальных смещениях растягивающих напряжений равными 0,061 м.

2. По степени разведанности и характеру угленасыщенности разреза на Эльгинском месторождении выделено два участка: детально разведанный "Северо-Западный" площадью 62 км² и изученный на поисково-оценочной стадии "Юго-Восточный" площадью 30 км². В настоящей работе рассмотрен только первый участок. Более точную геомеханическую оценку можно получить путем дополнения цифровой модели месторождения вторым участком и наложением карт региональной сейсмической активности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 42–48.
2. Центр «Геогрид». Геомеханическое моделирование <https://geogrid.ru/ru/deyatelnost/profilirujushchie-vidy-deyatelnosti/geomekhanicheskoe-modelirovanie>.
3. Ольховатенко В.Е. Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна [Текст] : монография. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 150 с.
4. Хлопцова М.В. Задачи геомеханического моделирования при разработке месторождений и эксплуатаций // ГИАБ. – 2017. – № 4. – С. 107–116.
5. Скоморошко Ю.Н., Павлов С.С., Кузнецов П.Ю. Оценка трещиноватости массива углевмещающих пород Эльгинского месторождения в их естественном залегании // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 68–73.
6. Моргунов И.В., Кузнецов П.Ю., Оценка трещиноватости массива горных пород по данным геофизических исследований скважин для повышения достоверности расчета параметров крутого нерабочего борта // Наука и образование. – 2011. – № 4. – С. 99–101.
7. Козырев А.А., Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э. Геомеханическое и горнотехнологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // ГИАБ. – 2015. – № 3. – С. 73–83.
8. Гриб Н.Н., Кузнецов П.Ю. Прогнозирование физико-механических свойств углевмещающих пород на основе данных геофизических исследований скважин и математических аппарата Марковской нелинейной статистики // Уголь. – 2018. – № 1. – С. 68–73.
9. Бердинова Н.О., Съедина С.А., Шамганова Л.С., Калюжный Е.С. Прогнозирование деформаций уступов скального массива Куржункульского карьера с использованием кинематического анализа // ГИАБ. – 2020. – № 4. – С. 58–68.
10. Раимжанов Б.Р., Хасанов А.Р. Оценка структурной нарушенности массива горных пород по рейтинговым классификациям для рудников Зармитанской золоторудной зоны // ГИАБ. – 2020. – № 5. – С. 115–127.
11. Бушков В.К. Применительная практика кинематического анализа устойчивости при обосновании параметров основных конструктивных элементов борта карьера // ГИАБ. – 2018. – № 10. – С. 30–42.
12. Угольная база России. Том V. Кн. 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 638 с.
13. Геотехнологии открытой добычи на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / отв. ред. С. М. Ткач. – Новосибирск : Гео, 2013. – 307 с.
14. Бердюгин В.А. Условия отработки «Эльгинского» месторождения каменных углей и планируемые комплексы оборудования для его разработки // ГИАБ. – 2009. – С. 373–379.
15. Кузнецов П.Ю. Оценка пространственной изменчивости свойств массива горных пород для оптимизации сети инженерно-геологических скважин при разведке угольных месторождений (на примере Эльгинского месторождения) // Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Томск, 2005. – 24 с.

16. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Методика оценки природной и технологической составляющих зольности добываемого угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5. – С. 88–100.
17. Гончарова Н.В. Структурирование запасов угольных месторождений сложного строения по уровням качества // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 6. – С. 165–172.
18. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. – 2007. – № 6. – С. 31–34.
19. Зорина Н.С. Оценка устойчивости откосов горных выработок при изменении гидродинамического режима подземных вод (на примере Коашвинского месторождения, Кольский полуостров) // Магистерская дис. – Санкт-Петербург, 2016. – 67 с.
20. Каспарян Э.В., Козырев А.А. Геомеханические проблемы при открытых горных работах // ГИАБ. – 2015. – № S56. – С. 134–143.

© Н. А. Немова, В. Л. Гаврилов, 2020