

УДК 622.831 DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-452-466

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ШАХТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

А.М. Никитина, Д.М. Борзых, С.В. Риб, О.А. Петрова

Изложена методика сопоставления результатов численного моделирования геомеханического состояния массива горных пород в окрестности выработок выемочного столба 4-6-37 и шахтных измерений электромагнитной эмиссии в угольном пласте. Проведены натурные исследования участка выемочного столба 4-6-37 при помощи оборудования «Ангел-М». Приведен анализ распределения изолиний полных вертикальных и горизонтальных напряжений в кровле выработки, а также отношения остаточной прочности пород к исходной. Выявлены опасные зоны в приконтурных породах выемочного столба. Подтверждены результаты, полученные при проведении математического моделирования геомеханических процессов по шахтным измерениям электромагнитной эмиссии в угольном пласте с достаточной удовлетворительной сходимостью.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, модель, математическое моделирование, напряжения, смещения, массив горных пород, остаточная прочность, электромагнитная эмиссия.

Разработка угольных месторождений требует постоянного совершенствования технологий с применением современной техники и развитием цифровизации процессов. На данном этапе развития угольной промышленности нормативными документами [1, 4] установлены требования к созданию на шахтах многофункциональных систем безопасности, включающих комплекс геофизических наблюдений и регионального (локального) прогноза газо- и геодинамических явлений, но, несмотря на это, наблюдается увеличение разрыва между современными апробированными эффективными подходами и требованиями нормативно-технической базы проектирования горнодобывающих предприятий.

Использование методов акустической и электромагнитной эмиссии для прогноза динамических явлений на угольных шахтах имеет большую роль в решении проблемы безопасности ведения горных работ. При помощи методов неразрушающего контроля параметров акустической и электромагнитной эмиссии появляется возможность осуществлять своевременную регистрацию и отслеживание опасных процессов динамического разрушения горных пород в массивах без вывода объектов из эксплуатации.

Применение информационных технологий при решении геомеханических задач подразумевает проведение исследований по нескольким направлениям. Среди них следует выделить математическое моделирование геомеханических процессов, происходящих в горном массиве. Компьютерное моделирование позволяет получать информацию о напряженно-

деформированном состоянии (НДС) углепородного массива для прогноза параметров геомеханических процессов, обоснования и реализации мероприятий, позволяющих исключить влияние неблагоприятных природных и техногенных факторов. При этом критерии оценки НДС массива для конкретных условий должны уточняться в процессе функционирования системы наблюдений и иметь цифровое выражение. Выполнение данных требований возможно только на основе использования современных и надежных аппаратных и программных комплексов проведения непрерывных сейсмических и деформационных наблюдений, увязанных в пространстве и во времени [2, 3, 5, 8-11]. В статье предлагается синтез натурального эксперимента измерения электромагнитной эмиссии в угольном пласте и математического моделирования геомеханического состояния массива горных пород.

Цель исследования – обосновать достоверность и подтвердить данные, полученные при проведении математического моделирования геомеханических процессов, по шахтным измерениям электромагнитной эмиссии.

Постановка задачи. Математическое моделирование

Для численного эксперимента в качестве объекта исследования приняты горно-геологические и горнотехнические условия отработки угольного пласта 6-ба на одной из шахт ООО «РУК», расположенной в Томь-Усинском геологоэкономическом районе Кузбасса. Шахта отнесена к сверхкатегорной по газу метану (абсолютная газообильность – 102 м³/мин., относительная газообильность – 24,5 м³/т). Все пласты шахтного поля склонны к самовозгоранию. Отрабатываемый пласт 6-ба относится к угрожаемым по внезапным выбросам угля, газа и горным ударам. Глубина ведения горных работ 360...490 м. Природная газоносность 14...18 м³/т.

В стратиграфическом разрезе пласт 6-ба залегает ниже пласта 7-7а, 7, 7 н.п. Расстояние между пластами составляет в среднем 55 м. Пласт пологопадающий на север-северо-запад под углами 6...9°. Гипсометрия пласта пологоволнистая. Угольный пласт сложного строения, содержит 2-6 породных прослоев, представленных мелкозернистыми алевролитами, реже углистыми алевролитами, суммарной средней мощностью 0,25 м. Мощность пласта в среднем составляет 4,52 м. Средняя мощность чистых угольных пачек 4,27 м. Увеличение мощности пласта на локальных участках характерно для нарушений типа "надвиг", где за счет сдвигания мощность может достигать 6,0...10,0 м. Коэффициент крепости угля f составляет 0,8...1,0; предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ равен 13,5 МПа; коэффициент крепости породных прослоев f равен 3 – 4. По своим качественным показателям уголь пласта 6-ба относится к марке ГЖ и характеризуется следующими показателями: зольность общепластовая 14,5 %, зольность чистых угольных пачек 8,2 %, толщина пластического слоя

24 – 26 мм, выход летучих веществ 36,9%, влажность 3,3%, объемный вес: угольного пласта 1,37 т/м³, чистых угольных пачек 1,31 т/м³.

Согласно горно-геологическим условиям залегания пласта 6-ба для отработки выемочного столба 4-6-35 в блоке №4 принят механизированный комплекс «GLINIK». Очистной механизированный комплекс представляет собой комплект взаимоувязанного оборудования, расположенного как в очистном забое, так и на конвейерном штреке. В состав комплекса GLINIK входит: механизированная крепь GLINIK 22/47 POz, выемочный комбайн KSW-1140E, забойный конвейер Rybnik-1100, штрековый перегружатель GROT-1100, дробилка Scorpion 3000P. В очистном забое 4-6-35, по всей длине установлены секции крепи в количестве – 170 шт., расположенных от конвейерного штрека 4-6-35 до вентиляционного штрека 4-6-35, при средней длине очистного забоя 295 м. Полная длина выемочного столба на период монтажа составляла 2230 м. На период проведения научно-исследовательских работ, остаточная длина выемочного столба составляла 850 м.

Для расчета прогнозных параметров НДС массива горных пород при взаимном влиянии подземных выработок выемочных столбов: отрабатываемого 4-6-35 и оконтуренного 4-6-37 пласта 6-ба создана двумерная геометрическая модель в виде вертикального разреза по падению свиты пластов, которая включает угольные и породные слои различной мощности (рис. 1). Длина модели на разрезе равна 1546 м, глубина разработки пласта относительно кровли вентиляционного штрека 4-6-37 принята равной 443 м, угол падения пласта 6 °, мощность пласта 4,40 м. Размеры модели принимаются такие, чтобы граничные условия не влияли на параметры зон сдвижения, надработки и опорного давления, возникающих в окрестности подземных выработок. Породные плиты рассматриваются как защемлённые по контуру модели. Предел прочности пород почвы при сжатии принят 40...45 МПа, пород кровли 40...65 МПа. Ширина угольного целика между конвейерным штреком 4-6-35 и вентиляционным штреком 4-6-37 принята 32,5 м, согласно плана горных выработок.

Для моделирования рассмотрено влияние 25 породных слоёв в почве пласта и 60 породных слоёв в кровле пласта. Для повышения точности расчёта параметров напряжённо-деформированного состояния массива горных пород угольный пласт разделён на 15, а породы непосредственной кровли на 25 условных слоёв. Методика исследований (рис. 2) включает проведение вычислительных экспериментов с применением метода конечных элементов [6, 7].

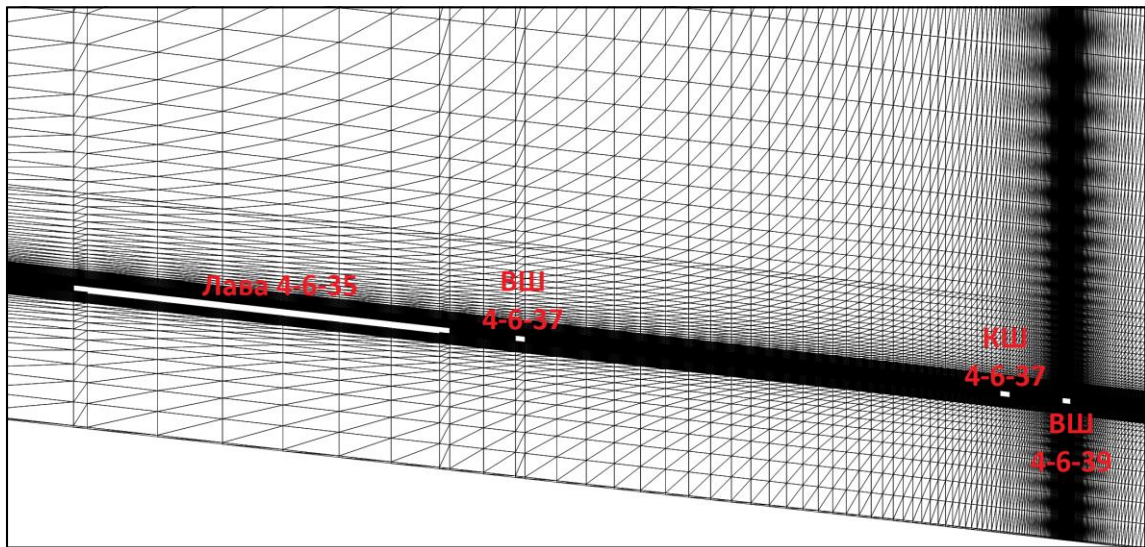


Рис. 1. Общий вид модели массива горных пород пласта 6-6а с делением на конечные элементы до отработки выемочного столба 4-6-37



Рис. 2. Методика исследований

При моделировании последовательно решались задачи распределения параметров геомеханических процессов в следующих постановках:

- упругий массив горных пород, находящийся в естественном состоянии;
- упругий массив горных пород после проведения горных выработок;

- упругопластический массив после проведения горных выработок с учётом перехода горных пород в некоторых конечных элементах в стадии предразрушения и разрушения;

- упругопластический массив после проведения горных выработок с учётом времени эксплуатации выработки, перехода горных пород в некоторых конечных элементах в стадии предразрушения и разрушения.

Общее количество конечных элементов в каждом варианте задачи равно 40400.

В результате решения задачи по каждому конечному элементу и варианту выдаётся следующая информация:

- координаты вершин и середины конечного элемента;
- модули деформаций пород при упругом, упругопластическом и реологическом состоянии пород;
- отношение остаточной прочности пород к исходной;
- вертикальные, горизонтальные, главные и касательные напряжения и деформации.

Построение графиков распределения указанных геомеханических параметров осуществлялось в виде изолиний в программе SURFER.

Определение уровня электромагнитной эмиссии. Результаты электромагнитного зондирования по выемочному столбу 4-6-37

Для изучения геомеханических процессов, происходящих в углепородном массиве в условиях исследуемой шахты, в выработках (рис. 3) выемочного столба 4-6-37 (вентиляционный и конвейерный штреки 4-6-37, монтажная камера 4-6-37, промежуточная разрезная печь 4-6-37 №1), проведены геофизические исследования, по оценке напряженно-деформированного состояния и степени деформации массива пород с использованием многофункциональной геофизической аппаратуры «Ангел-М» с функцией АЭШ конструкции АО «ВНИМИ» [5,8]. При этом глубина зондирования углепородного массива на каждом контрольном пункте измерений составляла 12 м. Замеры проводились с шагом 5 – 10 м. Производительность метода составляет в пределах 1 – 2 км в сутки. В каждом пункте измерения проводилось по 2 замера с привязкой к маркшейдерскому знаку – пикету.

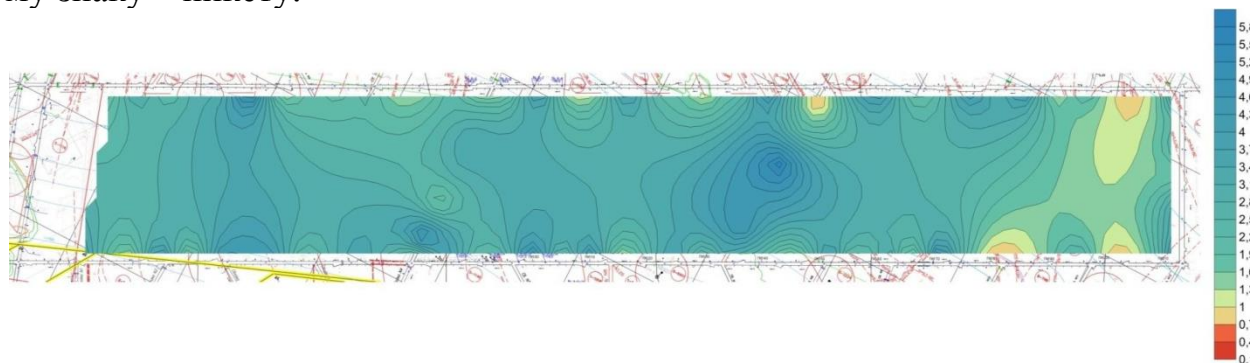


Рис. 3. Распределение напряжений в угольном массиве выемочного столба 4-6-37

Комплекс позволяет в автоматическом режиме выполнять в течение заданного интервала времени (10 сек) прием на антенну сигналов переменного магнитного поля и выделяет аналоговыми методами цифровой обработки сигнала импульсную составляющую нестационарных сигналов, связанную с естественным излучением горных пород. Фиксированное направление приема излучения задается ориентацией антенны. Аппаратура оценивает по выборке пиковых амплитуд импульсов параметры «А» и «В». По данным отсчетов во всех пунктах оценивается распределение электромагнитного излучения (ЭМИ). Относительно более напряженные участки отличаются по повышенным показателям параметров «А» и пониженным «В». В месте каждого замера (вертикально, вкрест оси выработки) автоматически собирается информация для дальнейшей обработки с построением графиков. Сущность мониторинга состояния массива горных пород в окрестности выработок геофизической аппаратурой «Ангел-М» с функцией АЭШ состоит в использовании зависимостей электропроводности от горного давления, степени расслоения и трещиноватости. Реализована схема дипольного электромагнитного зондирования и профилирования угольных пластов и пород кровли. Напряжённость массива горных пород оценивается по величине относительного параметра F , определяемого по отношению амплитуд регистрируемых электромагнитных импульсов в плоскости, перпендикулярной оси выработки. Для этого рамочные антенны устанавливаются в трёх направлениях бок-бок, кровля-почва и в воздушном пространстве выработки.

Такой геофизический метод позволяет определить участок массива, находящийся в стадии предразрушения и активного роста трещинообразования, сопутствующего процессу нарушения сплошности горной породы. Метод является неразрушающим и позволяет выделять опасно нагруженные участки в массиве горной выработки. В таблице приведены условные обозначения показателя напряжённости F массива горных пород к представленным ниже рисункам.

**Условные обозначения показателя напряжённости F массива
горных пород**

Значение	Параметр
0,087	повышенная напряженность массива
0,155	умеренная напряженность массива (сжатое состояние пород)
0,365	устойчивое (нормальное) состояние пород
0,998	трещиноватое состояние массива (статическое напряжение)
2,215	повышенная трещиноватость массива («Растягивающие» напряжения)
0,09	повышенные (опасные) напряжения массива
0,15	повышенные напряжения массива
0,55	нормальное состояние массива
1,5	трещиноватое состояние массива (статическое напряжение)

В вентиляционном штреке 4-6-37 было выполнено 45 замеров, в монтажной камере 4-6-37 - 5 замеров, в конвейерном штреке 4-6-37 - 47 замеров, в промежуточной разрезной печи 4-6-37 №1 и №2 по 5 замеров в каждой выработке.

В породах кровли вентиляционного штрека 4-6-37 на всем протяжении исследований наблюдается зона растягивающих напряжений массива, распространяющаяся на глубину до 2,0-3,0 м (рис. 4), которая в дальнейшем переходит в зону статического напряжения на глубину до 12 м (пикеты от ПК15 до ПК205 с шагом 5 м), что свидетельствует о разгруженном состоянии массива на момент проведения исследований.

Глубина, м	ВШ 4-6-37				сопряжени е с монтажкой
	ПК185	ПК190	ПК195	ПК200	ПК205
	T41	T42	T43	T44	T45
1	1	1,001	1	1	1,001
2	0,996	1,06	1,03	1,032	0,998
3	1,346	3,151	2,014	3,177	2,469
4	2,886	4,459	1,719	4,591	4,645
5	4,526	3,654	1,459	6,595	7,915
6	4,026	2,309	1,235	5,391	7,746
7	4,543	1,555	0,912	5,343	8,957
8	4,451	1,595	0,723	4,433	7,939
9	3,682	1,375	0,713	4,041	2,831
10	2,698	1,034	0,758	2,554	6,348
11		0,988	0,852	1,777	3,123
12					

Рис. 4. Фрагмент результатов электромагнитного зондирования в вентиляционном штреке 4-6-37

На контрольных точках T18 (ПК80), T16 (ПК95), T21 (ПК120), T39 (ПК180) и T43 (ПК195) зона растягивающих напряжений массива, распространяющаяся на глубину 6,0-9,0 м, переходит в область более плотных структур, что характеризует устойчивое состояние пород. На контрольной точке T6 (ПК45) с глубины 5,0 м зафиксирована зона пород, находящихся в сжатом состоянии, то есть область максимальных напряжений, которые, однако не превышают критических значений и не несут опасности для перехода массива в удароопасное состояние на момент проведения исследований.

В породах кровли вентиляционного штрека 4-6-37 на всем протяжении исследований наблюдается зона растягивающих напряжений массива, распространяющаяся на глубину до 2,0 – 3,0 м (рис. 5), которая в даль-

нейшем переходит в зону статических напряжений на глубину до 11 м (пикеты от ПК213 до ПК35 с шагом 5-10 м), что свидетельствует о разгруженном состоянии массива на момент проведения исследований. На контрольных точках Т53 (ПК205), Т54 (ПК200), Т62 (ПК166) и Т103 (ПК40) отмечается наличие плотных структур пород с глубины 3,0 м. Области плотных структур пород зафиксированы на контрольных точках Т55 (ПК195), Т56 (ПК190), Т63 (ПК164), Т65 (ПК160), Т68 (ПК154), Т70 (ПК150), Т82 (ПК120), Т85 (ПК105), Т87 (ПК95), Т80 (ПК90), Т100 (ПК55), Т106 (ПК25) и Т107 (ПК20) до глубины 4,0-8,0 м, переходящие затем в области растягивающих напряжений.

Глубина, м	Конвейерный штрек 4-6-37													
	ПК 213	ПК 205	ПК 195	ПК 190	ПК 185	ПК 180	ПК 175	ПК 170	ПК 168	ПК 166	ПК 164	ПК 162	ПК 160	ПК 154
	Т51	Т53	Т55	Т56	Т57	Т58	Т59	Т60	Т61	Т62	Т63	Т64	Т65	Т68
1	1,002	0,995	1	0,999	0,997	1,002	1	1,001	0,997	1	0,994	1	0,999	0,998
2	1,309	0,985	0,972	1,001	0,988	0,962	1,162	0,973	0,991	0,968	1,019	0,122	0,954	0,959
3	1,6	0,708	0,751	0,753	0,53	0,627	1,055	0,958	0,843	0,549	0,839	0,921	0,744	0,678
4	1,767	0,433	0,739	0,682	0,484	0,511	1,107	1,01	1,177	0,431	0,701	1,122	0,867	0,718
5	2,428	0,511	1,045	0,737	0,306	0,473	1,323	1,223	1,104	0,409	0,858	1,41	1,132	0,749
6	3,547	0,621	1,357	0,766	0,277	0,492	1,62	1,585	1,156	0,411	1,049	2,792	1,452	0,909
7	4,609	0,767	2,404	0,774	0,317	0,398	1,872	1,734	1,137	0,357	1,222	1,944	2,1	1,128
8	5,951	0,696	2,422	1,247	0,286	0,442	2,163	2,144	1,178	0,41	1,197	2,273	2,111	1,189
9	7,719	0,699	3,375	1,486	0,585	0,367	1,847	5,103	1,379	0,383	1,336	3,758	1,44	0,938
10	5,955	0,853	3,324	1,593	0,856	0,371	2,201	6,34	1,26	0,526	1,435	5,053	1,686	1,502
11	4,951	1,027	3,484	1,904	0,894			5,51		0,534	1,797	2,664	2,112	1,713

Рис. 5. Фрагмент результатов электромагнитного зондирования в конвейерном штреке 4-6-37

На точках проведения измерений Т57 (ПК185), Т58 (ПК180) и Т80 (ПК130) наблюдается чередование различных структурных состояний пород, от зон с растягивающим напряжением (зоны растяжения), до зон, где породы находятся в сжатом состоянии, характерном для напряжённого массива, так же как напряженное состояние пород с глубины 8,0 м прослеживается на точке Т83 (ПК115), однако зафиксированные напряжения не превышают критических значений и не несут опасности для перехода массива в удароопасное состояние на момент проведения исследований. На контрольных точках Т71 (ПК145), Т90 (ПК80) и Т105 (ПК30) зона растягивающих напряжений массива, распространяющаяся на глубину 7,0-8,0 м, переходит в область более плотных структур, что характеризует устойчивое состояние пород.

Анализом результатов проведённых геофизических исследований (рис. 6) в монтажной камере 4-6-37 установлено, что во вмещающем её угольном массиве (со стороны будущих завальной части и очистного забоя

лавы 4-6-37) полученные значения напряжений, в пределах установленной защитной зоны "п" равной 9 м, соответствующие категории ОПАСНО не установлены. При этом, на всем протяжении исследований по монтажной камере 4-6-37 (контрольные точки Т46, Т47, Т48, Т49, Т50) установлено, что на момент проведения исследований зоны растягивающих и статических напряжений массива пород кровли и почвы распространяются до глубины 11 м, то есть массив находится в разгруженном состоянии.

Глубина, м	Монтажная камера 4-6-37 (завальная часть)					Глубина, м	Монтажная камера 4-6-37 (Забой лавы)				
	T46	T47	T48	T49	T50		T46	T47	T48	T49	T50
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,02	1,44	1,08	1,24	1,06	2	1,01	1,48	1,07	1,21	1,06
3	1,52	1,47	1,37	1,17	1,32	3	1,46	1,56	1,31	1,18	1,31
4	1,17	1,40	1,22	1,23	1,25	4	1,19	1,44	1,25	1,29	1,32
5	1,06	1,28	1,11	1,17	1,20	5	1,08	1,35	1,14	1,24	1,41
6	0,87	1,29	1,02	1,19	1,27	6	0,92	1,34	1,06	1,33	1,34
7	0,89	1,30	1,11	1,28	1,32	7	0,92	1,44	1,15	1,28	1,42
8	0,78	1,29	1,11	1,19	1,45	8	0,82	1,26	1,20	1,27	1,53
9	0,76	1,32	1,18	0,98	1,39	9	0,85	1,41	1,21	1,10	1,51
10	0,79	1,38	1,17	0,96	1,28	10	0,84	1,46	1,21	0,98	1,42
11	0,71	1,19	1,08	0,97	1,29	11	0,76	1,25	1,14	1,01	1,37

Рис. 6. Результаты электромагнитного зондирования по монтажной камере 4-6-37

Анализом результатов проведённых геофизических исследований (представленных на рис. 7) в промежуточной разрезной печи 4-6-37 №1 установлено, что во вмещающем её угольном массиве полученные значения напряжений, в пределах установленной защитной зоны "п" равной 9 м, соответствующие категории ОПАСНО не установлены.

Глубина, м	Пром. Разрезная печь 4-6-37 №1 (Кровля)				
	50 м от сопр	100 м от сопр	150 м от сопр	200 м от сопр	250 м от сопр
	T91	T92	T93	T94	T95
1	0,997	1,003	0,997	1,005	1,004
2	1,02	0,909	1,041	1,536	1,189
3	1,198	0,973	0,974	1,362	1,301
4	1,275	1,263	1,175	1,892	1,292
5	1,534	1,426	1,166	2,09	1,544
6	2,454	2,002	1,81	1,817	2,082
7	2,245	3,124	2,347	2,225	2,444
8	2,958	3,179	2,957	3,808	2,325
9	5,758	3,515	3,423	3,357	3,928
10	5,127	1,484	3,048	3,412	2,159
11		0,961	4,672		2,821

Рис. 7. Результаты электромагнитного зондирования по промежуточной разрезной печи 4-6-37 №1

При этом в контрольных точках Т91, Т92, Т93, Т94 и Т95) установлено, что зоны отрицательных напряжений массива пород кровли и почвы распространяются до глубины 11 м, то есть массив находится в разгруженном состоянии.

Сопоставление результатов математического моделирования геомеханических процессов по шахтным измерениям электромагнитной эмиссии

Проведен анализ распределения вертикальных и горизонтальных напряжений, а также отношения остаточной прочности угля и пород к исходной, вычисленных методом конечных элементов, с величинами измеренного показателя напряжённости F массива горных пород.

На рис. 8 представлены графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров в угольном целике между вентиляционным штреком 4-6-37 и конвейерным штреком 4-6-35 до отработки выемочного столба 4-6-35.

На рис. 9 показаны графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров в угольном целике между вентиляционным штреком 4-6-37 и конвейерным штреком 4-6-35 после отработки выемочного столба 4-6-35. Правило знаков напряжений на рис. 8 и 9: сжатие < 0 ; растяжение > 0 .

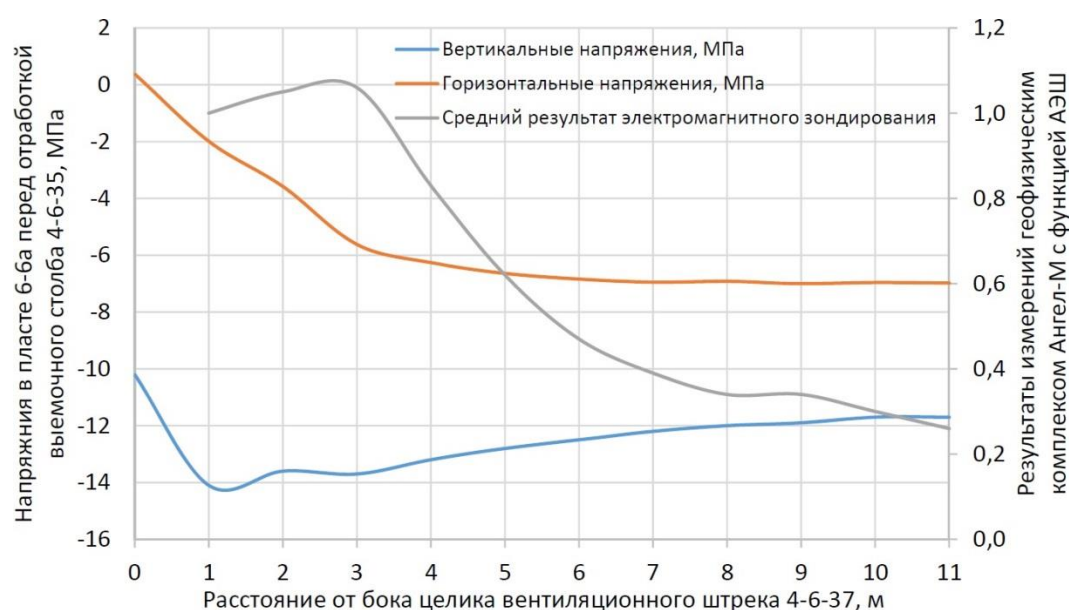


Рис. 8. Графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров до отработки выемочного столба 4-6-35

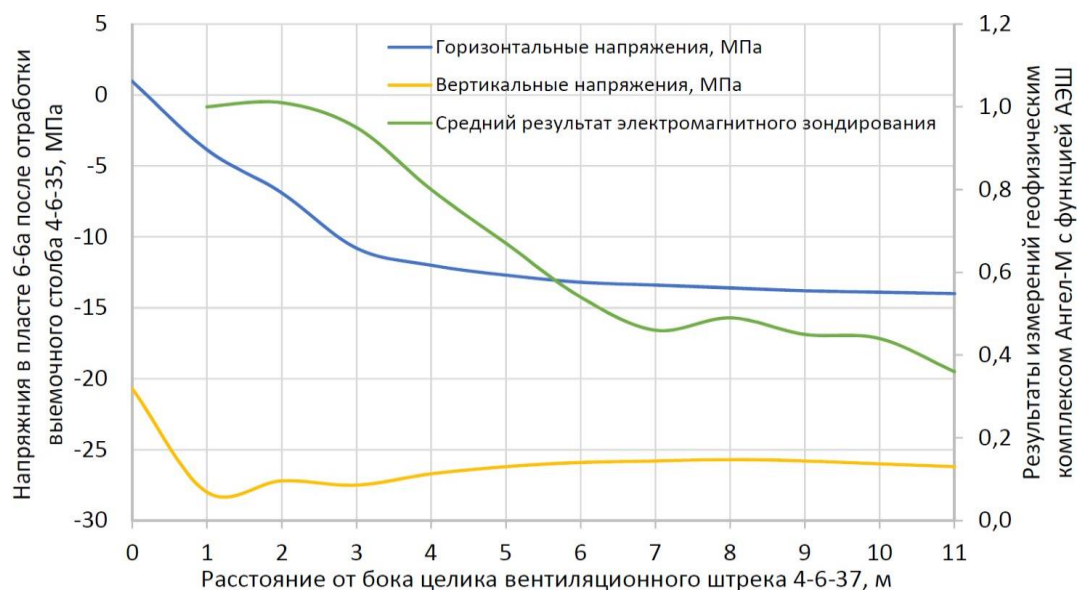


Рис. 9. Графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров после отработки выемочного столба 4-6-35

На рис. 10 показаны изменения показателя напряжённости F и отношения остаточной прочности угля к исходной в угольном целике до отработки запасов выемочного столба 4-6-35, а на рис. 11 – после отработки этого столба.

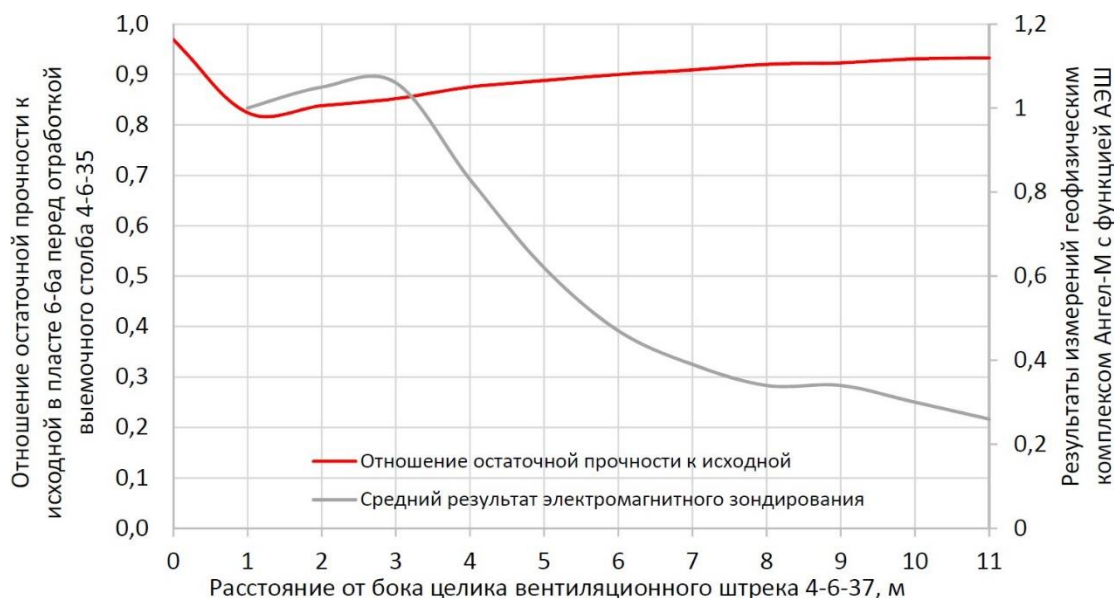


Рис. 10. Графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров до отработки выемочного столба 4-6-35



Рис. 11. Графики изменения вычисленных и измеренных геомеханических параметров после отработки выемочного столба 4-6-35

Таким образом, можно утверждать, что зависимость между вычисленными и измеренными геомеханическими параметрами сложная, однако четко прослеживается корреляционная зависимость распределения напряжений по приконтурному массиву горной выработки (на глубину от 3 до 5 м), что свидетельствует об адекватности применяемого метода для прогноза геомеханической обстановки в приконтурном массиве горных выработок в условиях пласта 6-ба с целью предотвращения опасного проявления горного давления.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 507; зарегистрирован 18.12.2020 № 61587).
2. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) / С.Н. Мулёв, В.Н. Старников, О.А. Романевич // Уголь, 2019. № 10 (1123). С. 6-14.
3. Прогнозирование трещинообразования в деформируемых конструкционных материалах и горных породах по их электромагнитной эмиссии / Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая, М.Д. Шарапова, В.И. Щелканова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Вып. 2. № 3. С. 163-168.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторин-

гу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Сер. 05. Вып. 49. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2020. 148 с.

5. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт // ОАО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ». Санкт-Петербург, 2012. 82 с.

6. Риб С.В., Фрянов В.Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для численного моделирования напряжённо-деформированного состояния неоднородных угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. №3. С. 367–372.

7. Численное моделирование геомеханического состояния неоднородных угольных целиков методом конечных элементов / С.В. Риб, В.В. Басов, А.М. Никитина, Д.М. Борzych. Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Новокузнецк, 2014. С. 123-128.

8. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры «Ангел-М» в угольной и рудной промышленности // Уголь. 2014. № 10. С. 14–19.

9. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Стадийность процесса разрушения на основе исследования ЭМИ-излучения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 1. С.12–21.

10. Use of Electromagnetic Radiation from Fractures for Mining-Induced Stress Field Assessment / D. Song [et al.] // Journal of Geophysics and Engineering. 2018. Vol. 15. Issue 4. P. 1093–1103.

11. Потокин А.С., Кузнецов Н.Н., Земцовский А.В. Обзор методов измерения параметров акустической и электромагнитной эмиссии в массивах горных пород // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Вып. 10. № 5 (18). С. 132-138.

Никитина Анастасия Михайловна, канд. техн. наук, доц., nik.am_78@mail.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Борzych Дмитрий Михайлович, ст. препод., 25borz@rambler.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Риб Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, доц., seregarib@yandex.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Петрова Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц., ol_petrova@mail.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет

VALIDATION METHODOLOGY FOR THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING
OF GEOMECHANICAL PROCESSES BASED ON MINE ELECTROMAGNETIC EMISSION
MEASUREMENTS IN THE COAL SEAM

A.M. Nikitina, D.M. Borzyh, S.V. Rib, O.A. Petrova

The validation procedure of the results of numerical modeling of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of the mine workings of mine pillar 4-6-37 on mine electromagnetic emission measurements in the coal seam is presented. Field studies of the area of the mine pillar 4-6-37 with the equipment "Angel-M" were carried out. The analysis of the distribution of isolines of total vertical and horizontal stresses in the mine roof, as well as the ratio of the residual rock strength to the initial one is given. Dangerous zones in the near-surface rocks of the excavation pillar are identified. The results obtained by mathematical modeling of geomechanical processes by mine electromagnetic emission measurements in the coal seam with sufficient satisfactory convergence have been confirmed.

Key words: stress-strain state, model, mathematical modeling, stresses, displacements, rock mass, residual strength, electromagnetic emission.

Nikitina Anastasiia Mikhailovna, candidate of technical sciences, docent, nik.am_78@mail.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Borzyh Dmitrii Mikhailovich, senior lecturer, 25borz@rambler.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Rib Sergey Valerievich, candidate of technical sciences, docent, seregari@yandex.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Petrova Olga Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, ol_petrova@mail.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University

Reference

1. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules in coal mines" (approved by the order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 08.12.2020 No. 507; registered on 18.12.2020 No. 61587).
2. The current stage of development of the geophysical method of registration of natural electromagnetic radiation (UEMI) / S.N. Mulev, V.N. Starnikov, O.A. Romanevich // Coal, 2019. No. 10 (1123). pp. 6-14.
3. Prediction of crack formation in deformable structural materials and rocks by their electromagnetic emission / G.I. Kulakov, G.E. Yakovitskaya, M.D. Sharapova, V.I. Shchelkanova // Interexpo Geo-Siberia. 2016. Issue 2. No. 3. pp. 163-168.
4. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits". Ser. 05. Issue 49. M.: Closed Joint Stock Company "Scientific and Technical Center for Research of Industrial Problems security", 2020. 148 p.
5. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I. Methodological guidelines for the creation of systems for monitoring the state of the mining massif and the prediction of rock impacts as elements of a multifunctional safety system of coal mines // JSC "Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying - intersectoral Research Center VNIMI". St. Petersburg, 2012. 82 p.

6. Rib S.V., Fryanov V.N. Development of a complex of problem-oriented programs for numerical modeling of the stress-strain state of inhomogeneous coal targets // Mining information and Analytical Bulletin, 2015. No. 3. pp. 367-372.

7. Numerical modeling of the geomechanical state of inhomogeneous coal targets by the finite element method / S.V. Rib, V.V. Basov, A.M. Nikitina, D.M. Borzykh. High-tech technologies for the development and use of mineral resources: Novokuznetsk, 2014. pp. 123-128.

8. Yakovlev D.V., Mulev S.N. The experience of using multifunctional geophysical equipment Angel-M in the coal and ore industry // Coal, 2014. No. 10. pp. 14-19.

9. Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. The stages of the destruction process based on the study of EMI radiation // Physico-technical problems of mining. 1991. No. 1. pp.12-21.

10. Use of Electromagnetic Radiation from Fractures for Mining-Induced Stress Field Assessment / D. Song [et al.] // Journal of Geophysics and Engineering. 2018. Vol. 15. Issue 4. P. 1093–1103.

11. Potokin A.S., Kuznetsov N.N., Zemtsovsky A.V. Review of methods for measuring acoustic and electromagnetic emission parameters in rock massifs // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019. Issue 10. No. 5 (18). pp. 132-138.

УДК 622.831.3 DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-466-474

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ НА СТЕНКАХ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

С.Д. Яцыняк, Е.А. Ермолович

Показано предназначение устройства – для измерения деформаций стенок горных выработок и последующего вычисления по ним действующих напряжений в массиве горных пород. Использование его позволит получать более достоверные измерения, за счет неизменности непосредственных контактов реперных узлов с глубокими слоями горной породы и особо надежной конструкции самих узлов. Кроме того, устройство просто в исполнении и надежное в эксплуатации, обеспечивает стабильность реперной точки.

Ключевые слова: деформационные методы; напряженно-деформированное состояние массива горных пород; частичная разгрузка; устройство для измерения деформаций, реперы.

Инструментальные методы изучения состояния массивов горных пород и проявлений горного давления в процессе добычи полезных ископаемых имеют очень большое значение в комплексе научных исследований, так как натурным экспериментом, как правило, начинается и заканчивается разработка теоретических представлений в геомеханике.

Наиболее часто используемыми методами определения напряжений на поверхности горных выработок являются [1, 2]: метод полной разгрузки, метод частичной разгрузки и метод компенсационной нагрузки.