

УДК 622.83.551.252

Б.Ю. Зуев, Г.И. Коршунов, А.И. Пальцев

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СОСТАВНАЯ
ЧАСТЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Представлены данные о современном состоянии геомеханического мониторинга при подземной разработке МПИ и обосновывается целесообразность включения в систему мониторинга физического моделирования для повышения ее надежности в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: геомеханический мониторинг, физическое моделирование, сложные горно-геологические условия.

В настоящее время при подземной разработке МПИ в сложных горно-геологических условиях проведение регламентных профилактических мероприятий, устанавливаемых действующими в России инструкциями, часто приводит к неоправданно высоким экономическим затратам, не гарантируя повышения безопасности горных работ [1]. В частности, по мнению авторов, при оценке удароопасности надежность определения опасных динамических явлений составляет не более 50%. Сходные выводы сделаны в работе [2] на примере шахт Воркутского месторождения. На шахтах регулярно проводятся локальные, и, особенно, региональные мероприятия по предотвращению динамических явлений. Выполненный анализ возникновения динамических явлений показал, что на Воркутском месторождении 20-30 % внезапных выбросов происходят после выполнения мероприятий; от 60 до 45 % – при выполнении мероприятий, особенно при проведении сотрясательного взрывания и 20-15 % происходили впервые без проведения защитных мер. Количество горных ударов,

возникших после проведения мероприятий составило 50 %, при выполнении мероприятий 40 % и около 10 % произошло на участках, ранее отнесенных к опасным по горным ударам.

Такое распределение условий возникновения динамических явлений свидетельствует о неэффективности применяемых мер, несоответствии их данным горно-геологическим и горнотехническим условиям, о недостаточной обоснованности защитных мероприятий и способов прогноза.

Основная трудность обеспечения безопасности горных работ связана со сложностью своевременного обнаружения изменений горно-геологических условий и геомеханической ситуации и принятия соответствующих мер, что особенно актуально при быстром продвижении лав. Высокие скорости продвижения вызывают интенсивное увеличение опорного давления впереди забоя. Особое внимание требуется уделять и зонам геологических нарушений, где горное давление способно быстро увеличиваться, создавая опасность возникновения динамических явлений, а также явле-

нию перераспределения напряжений в подработанном массиве и надработанной толще, возникающее при техногенном воздействии, которое сопровождается колебательным процессом и имеет волновой характер, как и естественные перераспределения напряжений, возникающие при землетрясениях различной интенсивности [2].

Мировой опыт показал, что наиболее перспективный путь обеспечения безопасности горного производства – это создание современных оперативных систем мониторингового контроля над состоянием массива и прогноза возникновения опасных динамических явлений.

Мониторинг должен быть основан на компьютерных системах оперативной обработки данных с датчиков геофизических полей, напряжений и деформаций и обеспечивать дистанционное измерение и контроль в реальном времени, и выдачу оператору непрерывной информации об изменениях в состоянии массива, локализации зон повышенного горного давления. Системы должны включать в себя компьютерные модели исследуемого участка для интеллектуального анализа возможности возникновения нештатных ситуаций и выдачи рекомендаций по управляющим решениям.

Однако применяемые методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) имеют низкую надежность. Например, надежность оценки НДС массива бурением прогнозных скважин по углю на больших глубинах даже при прогнозе горных ударов не превышает 60-70 %. Надежность оценки НДС по выходу штыба повышается при одновременных замерах температуры пласта и использовании наблюдений по реперным станциям. Несколько выше надежность оценки НДС массива до 75-80 % позволяют получить сейсми-

ческие методы, например, сейсмического просвечивания.

Математические методы, в том числе и методы компьютерного моделирования также сталкиваются с серьезными препятствиями, при наличии комплекса факторов, существенно усложняющих горно-геологические условия. Кроме того, математические методы исследований часто не позволяют распознать глубинный механизм геомеханических процессов, связанный с накоплением и выделением упругой энергии массива, ее преобразованием в другие виды энергий: тепловую, энергию сейсмических колебаний, в кинетическую энергию разрушенных блоков, с работой пластического деформирования и разрушения горных пород. Недостаточно исследованным является влияние жидкой фазы, а также газообразной фазы в виде сорбированного и свободного газа. Таким образом, задача не решается в общей постановке и поэтому разбивается на ряд частных задач посредством отсечения лишних условий и введения различных упрощающих допущений [3].

Рассмотрим некоторые характерные примеры решения геомеханических задач с помощью методов компьютерного моделирования.

С помощью метода МКЭ определяются параметры и границы зоны обрушения кровли при очистных работах (высота зоны обрушения, предельный пролет и шаг обрушения) при генеральном и вторичных обрушениях. Авторы оценивают погрешность расчетов в 15-20%. Однако, как видно из прилагаемого графического материала, расчетные схемы при генеральном и вторичных обрушениях не соответствуют известным реальным картинам обрушения кровли с образованием блочных структур, а следовательно, и реальному механизму обрушения и его параметрам.

Сравнение результатов определения напряжений в зоне опорного давления обрабатываемого угольного пласта с помощью натуральных методов и методов компьютерного моделирования на базе программного комплекса STRAIN, прошедшего государственные приемочные испытания и внедренного в ряде предприятий Донбасса, позволило установить существенное отличие расчетных и натуральных данных. В отличие от расчетных данных фактические вертикальные смещения имеют значительно более сложный характер и другие количественные характеристики, например 2 положительных и 2 отрицательных экстремума (вместо двух экстремумов) или смещение максимальных вертикальных вглубь массива на 10 м дальше расчетных. Полученные результаты связаны с установленной волновой закономерностью распределения напряжений с зональным проявлением деформационных свойств пород, которая не была выявлена в идеализированной математической модели.

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников и простые тесты позволяют установить, что численные методы, используемые в настоящее время в наиболее популярных пакетах для решения задач с конечными (т.е. не бесконечно малыми) деформациями, недостаточно корректны и дают адекватную оценку лишь в частных случаях. Отказ от гипотезы малости смещений и деформаций в механике деформируемого тела приводит к значительным проблемам, которые до сих пор до конца не решены, несмотря на свою актуальность для практических приложений. Попытка очертить границы применимости двух популярных пакетов (ANSYS и LS-DYNA) для решения рассматриваемого круга задач показала, что наибольшие погрешности

наблюдались при одновременном изменении сдвиговой деформации и повороте главных осей. В документации к пакету ANSYS [4] сказано, что получаемым в таких случаях результатам не стоит доверять. Тем не менее полученные результаты свидетельствуют о том, что абсолютная погрешность вычисления компонент тензора деформации достигает 15 – 70%.

Альтернативой компьютерным моделям в отдельных случаях исследования процессов в сложных горно-геологических условиях могли бы быть методы физического моделирования [5] и в особенности методы моделирования на эквивалентных материалах (ЭМ), которые надо адаптировать к условиям мониторинга.

В данной работе предложен комплекс методических и технических решений, позволяющих включить моделирование на ЭМ в общую систему мониторинга на стадии разработки МПИ на основе новых подходов к моделированию структурной нарушенности массива, временному подобию происходящих процессов с учетом реологических и динамических, волновых процессов, к энергетическому подобию с разработкой соответствующих им типам эквивалентных материалов (ЭМ), к оперативности моделирования для исследований в режиме реального времени. Новые методы и технические средства, позволяющие решить данную проблему, приведены на рис. 1, схема включения физических моделей в общую систему мониторинга – на рис. 2.

Комплекс предлагаемых решений базируется, прежде всего, на новых модернизированных методах исследования геомеханических процессов в сложных горно-геологических условиях на моделях из эквивалентных материалов: обеспечение критериев



Рис. 1. Новые методы и технические средства физического моделирования

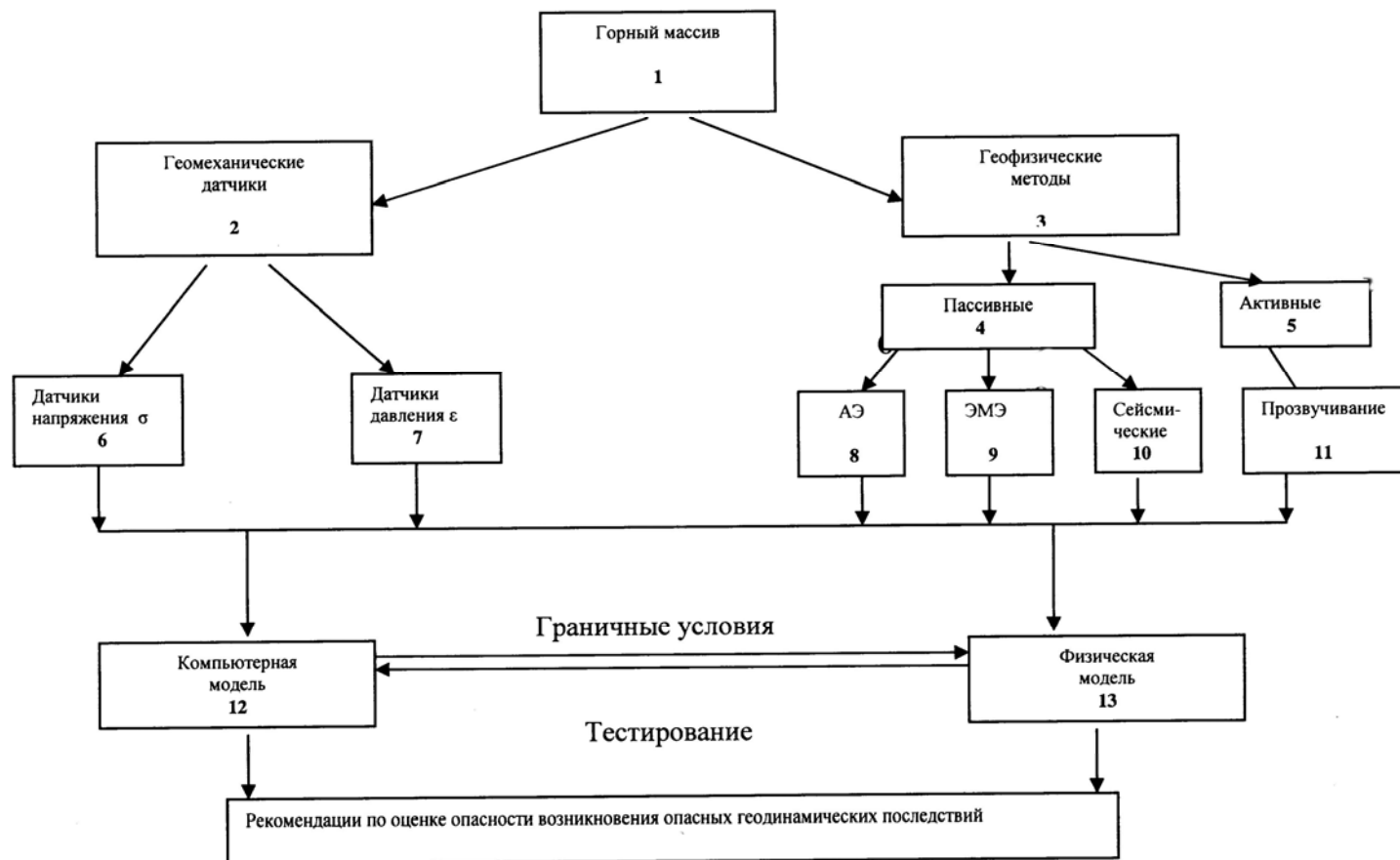


Рис. 2. Структурная схема геомеханического мониторинга на стадии разработки, включающая модели из ЭМ

термодинамического подобия; обеспечение воспроизведения самого широкого круга структурных нарушений (разрывных нарушений, зон контакта блоков, самих блочных структур, различных типов трещиноватости); воспроизведение процессов дегазации угольных пластов и вмещающих пород. Данные методы исследований были разработаны и внедрены за последние 15 лет в лабораториях ВНИМИ и СПГГИ и нашли свое отражение в ряде печатных работ [6, 7, 8, 9].

Для реализации этих методов был разработан ряд технических средств:

1. Эквивалентные материалы с параметрами, обеспечивающими соблюдение критериев энергетического и временного подобия протекающих процессов; воспроизведение шовных зон контакта между блоками с широким диапазоном прочностных характеристик; воспроизведение изменения деформационных характеристик материалов при моделировании процессов дегазации [10, 11, 12]

2. Миниатюрные датчики, не влияющие на исследуемые процессы и позволяющие определять напряжения во всем диапазоне масштабов моделирования с высокой надежностью и точностью [13, 14].

3. Автоматизированная система управления граничными условиями, включающая в себя статические и динамические электромеханические исполнительные механизмы (ЭИМ), позволяющие реализовывать различные варианты взаимодействия исследуемой области массива с вмещающими породами. Управление системой производится с компьютера при помощи специального программного обеспечения, позволяющего воспроизводить произвольные эпюры нагрузок, как в режиме заданных нагрузок, так и в режиме заданных деформаций [15].

4. Комплекс разработанных устройств и специального программного обеспечения, позволяющий оперативно проводить исследования модели, обеспечивая их органичное включение в общую систему оперативного геомеханического мониторинга.

Приведенная на рисунке 2 структурная схема геомеханического мониторинга на стадии разработки МПИ показывает, что исходная информация о состоянии массива с датчиков различных типов и результаты исследования массива «закладываются» одновременно, как в компьютерную, так и в физическую модель. Опыт моделирования на эквивалентных материалах показывает, что применение данного метода наиболее наглядно и эффективно при использовании плоских моделей, воспроизводящих с наибольшей достоверностью сечение протяженных выработок.

«Сильной» частью современных компьютерных моделей является возможность решения геомеханических задач в объемной постановке и переборе большого количества вариантов параметров моделей. Данное обстоятельство подсказывает путь к одному из вариантов компьютерных и физических моделей: после проведения компьютерного моделирования определяются граничные условия для сечений протяженных выработок наиболее проблемных участках. Эти условия закладываются в специальное программное обеспечение граничных условий автоматизированной системы управления силовыми элементами стенда для физического моделирования. После этого исследуется физическая модель. Наиболее целесообразно использовать данный «сценарий» при исследовании процессов разрушения массива, эволюции блокообразования, динамических процессов, процессов энергообмена, то есть в

той области, в которой математическое моделирование сталкивается с наибольшими трудностями. Этот подход был реализован при проведении исследований в условиях шахт СУЭК Кузбасса, показал свою эффективность и нашел отражение в работе [15].

Другим путем взаимодействия компьютерного и физического моделирования является тестирование компьютерных программ на «проблемных» участках. В этом случае параллельно решается одна и та же задача на обоих типах систем моделирования и производится тестирование компьютерной модели по физической. Такой подход основывается на более надежных результатах ис-

следования на физических моделях процессов, происходящих в массивах с эволюцией сплошной среды в дискретную и при необходимости учета не только полей напряжений и деформаций, но и других физических и геофизических полей. Результаты подобного тестирования приведены в работе [16] по исследованию процессов деформирования массива при дегазации угольных пластов.

Предлагаемые методы включения физического моделирования в общую систему мониторинга, на наш взгляд, позволяют повысить надежность прогноза возникновения опасных динамических явлений и более полно обосновать рекомендации по их предотвращению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Охрана* подготовительных выработок целиками на угольных шахтах Наука, С-Пб, 2009 Артемьев В.Б., Коршунов Г.И., Логинов А.К., Шик В.М., Ютяев Е.П.
2. *Глушихин Ф.П., Шклярский М.Ф., Злотников М.С.* Измерение напряжений в моделях из эквивалентных материалов Прогноз геомеханических процессов и управление горным давлением на шахтах: Сб.научн.тр. - Л.: ВНИМИ, 1985.- С57-62.
3. *Яковлев Д.В., Тарасов Б.Г., Зуев Б.Ю.* Моделирование геомеханических процессов. Горный информационно-аналитический бюллетень №2 1999 г., Московский государственный горный университет. - С.222-226..
4. ANSYS 6.1 Documentation, Theory Reference, Chapter 3. Structures with Geometric Nonlinearities.
5. *Моделирование* в геомеханике М.: Недра, 1991- с. 81-106 Ф.П. Глушихин, Г.Н. Кузнецов, М.Ф. Шклярский и др. -
6. *Зуев Б.Ю., Шклярский М.Ф.* Исследования на моделях геомеханических процессов в структурно нарушенных массивах Сб.научн.тр."Эффективная и безопасная подземная добыча угля на базе современных достижений геомеханики. Международная конференция" СПб: ВНИМИ, 1996 г. - С. 33-36
7. *Зуев Б.Ю., Злотников М.С.* Проблемы разработки эквивалентных материалов для комплексных моделей структурно нарушенных массивов Сб.научн.тр."Эффективная и безопасная подземная добыча угля на базе современных достижений геомеханики. Международная конференция" СПб.: ВНИМИ, 1996 г. - С. 166-169.
8. *Зуев Б.Ю., Мулев С.Н.* Перспективы исследования геофизических полей в моделях из эквивалентных материалов Сб. научн.тр. "Горная геофизика. Международная конференция" СПб.: ВНИМИ, 1998 г. - С.503-504
9. *Зуев Б.Ю., Гурьянов В.В. Слюсарев Н.И., Шик В.М., Карманский А.Т. Мустафин М.* Исследование процессов деформирования массива при заблаговременном извлечении метана из угольных пластов "Уголь в XXI веке", СПб.:СПГТИ, 2000г.,С.41
10. *Шабаров А.Н., Зуев Б.Ю.* Физическое моделирование тектонически напряженных зон Сб.научн.тр. "Горная геомеханика и маркшейдерское дело" СПб.: ВНИМИ, 1999 г. - С.21-26.
11. *Шабаров А.Н., Лодус Е.В., Зуев Б.Ю.* Исследование процессов деформирования и разрушения массива горных пород в зоне влияния тектонических нарушений Статья Сб.научн.тр. "Деформирование и

разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных выработках. IX Международная научная школа” Симферополь:Таврический нац.университет им. В.И. Вернадского, 1999 г. – С.85-86.

12. Зуев Б.Ю., Мустафин М.Г. Формирование зон разгрузки и повышенных напряжений в горном массиве при добыче газа промысловым способом на углеметановых месторождениях Статья Геодинамическая и экологическая безопасность при освоении месторождений газа, его транспортировке и хранении. III Международное рабочее совещание, 27-29 июня 2001г, СПб., 2001 г. - С.307-311.

13 А.с. №1208486 (СССР) Датчик давления Авторское свидетельство Бюл.№4, 1986 г. №3761414/24-10, заявлено 27.06.84, опубл. 30.10.86. 1стр. Глушихин

Ф.П. Злотников М.С., Шклярский М.Ф., Зуев Б.Ю.

14. А.С. №17778566. Датчик давления Авторское свидетельство Бюл.изобретений № 44, 1992 г., № 462113/10, заявлено 31.10.88 Зуев Б.Ю., Глушихин Ф.П., Калинин В.П. , Дукина Л.А.

15. *Исследование* геомеханических процессов при подземной разработке полезных ископаемых на автоматизированном стенде для физического моделирования Статья СПГИ (ГУ), Неделя горняка, 2009 г.

16. Зуев Б.Ю., Мустафин М.Г. Применение методов физического и имитационного (компьютерного) моделирования для решения задач управления геомеханическим состоянием массива при добыче метана из неразгруженных пластов Статья МГУ, Неделя горняка, 2002 г.- С.75-78. **ПАБ**

Коротко об авторах

Зуев Б.Ю. – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, Санкт-Петербургский Государственный Горный Институт (ГУ), zuev_bu@spmi.ru
Коршунов Г.И. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БП и РГП Санкт-Петербургский Государственный Горный Институт (ГУ), bprp@spmi.ru
Пальцев А.И. – начальник Технического управления, ОАО «СУЭК» - Кузбасс, Loginov AK@suek.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
СКАЧКОВА Екатерина Сергеевна	Формирование эффективного спроса газозольных станций России на угольное топливо	08.00.05	к.э.н.
ПЕТУХОВ Павел Петрович	Организационно-экономическое обоснование стратегических направлений развития угледобывающих предприятий	08.00.05	к.э.н.
РЕШТАНЕНКО Алексей Александрович	Обоснование технологии комплексного освоения запасов ураноугольных месторождений Подмосковского бассейна	25.00.22	к.т.н.