© Б.Ю. Зуев, Г.И. Коршунов, Е.П. Ютяев, 2010

УДК 622.83.551.252

Б.Ю. Зуев, Г.И. Коршунов, Е.П. Ютяев

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МНОГОШТРЕКОВОЙ ПОДГОТОВКЕ ВЫЕМОЧНЫХ СТОЛБОВ

Представлены данные о современных методах и средствах физического моделирования, включающих новые типы эквивалентных материалов, средства оперативного изменения граничных условий, датчики напряжений применительно к исследованию геомеханических процессов при многоштрековой подготовке выемочных столбов.

Ключевые слова: методы и средства физического моделирования, эквивалентные материалы, граничные условия, многоштрековая подготовка.

Эксперименты на физических моделях имеют по сравнению с математическим моделированием свои достоинства и недостатки. К их основным достоинствам относится: обеспечение наглядности, обзорности и возможности непосредственных наблюдений за отдельными этапами моделируемого процесса; возможность моделирования процессов, плохо воспроизводимых математическими методами (например, обрушения пород, в особенности непрерывно продолжающиеся разрушения породных слоев, сопровождающиеся сдвижениями массива по плоскостям хрупких изломов и изломов сдвига, *а* также раскрытием трещин отдельности, и деформации крепи после превышения предела упругости пород.); возможность исследования влияния времени на развитие деформационных процессов; возможность проверки достоверности результатов моделирования и их использования в практике путем непосредственного сравнения с наблюдаемыми в шахте явлениями путем визуальных наблюдений и проведении простейших измерений; сравнительно небольшие затраты времени и средств при решении большинства геомеханических задач [1].

К недостаткам физического моделирования по сравнению с математическим моделированием относятся: значительная трудность варьирования в широких пределах параметров, оказывающих влияние на моделируемые процессы; сложность воспроизведения пространственных процессов; сложность надежного определения напряжений в модели, так как физическая модель позволяет получать количественные показатели только при условии применения датчиков, не нарушающих условий моделирования [1].

В целом - эксперименты на физических моделях целесообразны во всех тех случаях, когда в исследуемых процессах принимает участие комплекс различных сложных природных явлений.

Один из наиболее эффективных методов физического моделирования - на моделях из эквивалентных материалов (ЭМ) основан на впервые высказанной и осуществленной Г. Н. Кузнецовым идее использования эк-

вивалентных материалов, соответствующих в масштабе моделирования реальным материалам, для имитации на моделях массивов горных пород [2]. Методика реализуется не только в России, но и в ряде других стран. Например, в настоящее время - в лаборатории рудничной крепи и механики горных пород института «Бергбауфоршунг».

Эксперименты на моделях должны во всех случаях увязываться, с одной стороны, с шахтными наблюдениями за качественным характером проявлений горного давления и с проводимыми в подземных условиях измерениями и, с другой стороны, с результатами расчетного определения величин горного давления.

С помощью этого метода был проведено исследование условий работы целиков при подготовке выемочных столбов двумя штреками в условиях шахт «СУЭК-Кузбасс» для разработки методов определения размеров околоштрековых целиков и дальнейшего применения данной схемы на практике.

Реализация моделирования на ЭМ осуществлялась на базе критериев подобия и комплекса разработанных методик и технических средств, включающих в себя новые эквивалентные материалы, стенды для изготовления и исследования моделей, устройства автоматического регулирования граничных условий, датчики напряжений и деформаций, информационно – измерительные системы.

На основании анализа обширных натурных и модельных исследований по изучению влияния скорости подвигания лавы на параметры проявления горного давления [3, 4] было установлено, что при увеличении скорости

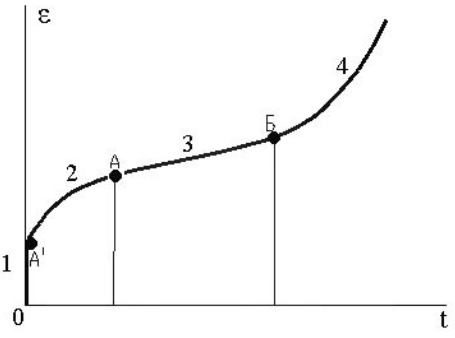

Рис. 1. Общий вид изменения деформаций во времени породных образцов и образцов из ЭМ

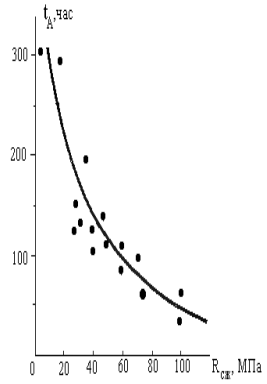

Рис. 2. График зависимости $t_A = f$ (Rсж.) для породных образцов

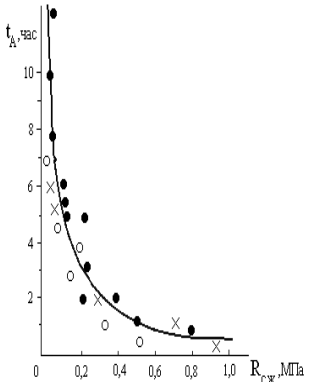

Рис. 3. -График зависимости $t_A = f$ (Rсж.) для образцов из ЭМ

подвигания лавы уменьшается расслоение пород непосредственной кровли, увеличивается шаг осадки основной кровли, уменьшается отжим угля из забоя и высота зоны беспорядочного обрушения пород подработанной толщи, максимум опорного давления смещается в сторону линии забоя, нагрузка на крепь уменьшается.

Среди всех рассмотренных факторов скорость подвигания очистного забоя наиболее существенное влияние оказывает на процессы в зоне опорного давления.

Таким образом, при моделировании работы околоштрекового целика при подготовке лавы спаренными выработками необходимо воспроизвести явления, возникающие при высоких скоростях подвигания забоя, главным из которых по влиянию на работу целика является перемещение максимума опорного давления к поверхности обнажения целика. Для моделирования этого явления необходимо, чтобы соотношение времени ведения горных работ и стабилизации процессов деформирования в модели и натуре соответствовали друг другу.

В работе [5] рассмотрены вопросы, связанные с направленным регулированием масштаба времени.

При регулировании α_t нет необходимости одновременного обеспечения критериев подобия по медленно и быстро протекающим процессам. В соответствии с одним из основных требований моделирования [2] необходимо из всей совокупности влияющих факторов выделить тот из них, который предопределяет ход исследуемого процесса. Таким образом, при исследовании медленно протекающих процессов нет необходимости точного воспроизведения динамической закономерности деформирования горных пород. В противном случае - при определении масштаба времени следует исходить из законов динамики.

Анализ кривых ползучести образцов горных пород и эквивалентных материалов показывает, что процесс деформирования образцов можно разбить на ряд стадий, каждая из которых отражает определенное физическое состояние рассматриваемого процесса (рис. 1). Так, например, стадия 1 соответствует мгновенному деформированию образца горной породы или эквивалентного материала, 2-ая стадия - деформированию с переменной скоростью, 3-я стадия - постоянной скорости деформирования образцов, 4-я стадия соответствует ускоренному деформированию образцов непосредственно перед разрушением.

Стадия 4 соответствует степени напряженного массива $\sigma_z/R_{сж}$ = 0,6÷0,9. При меньших значениях $=\sigma_z/R_{сж}$ стадия 4 , как правило, отсутствует и остаются только три первые стадии. На графике можно выделить ряд характерных точек А′, А и Б. Наибольший интерес при анализе процесса деформирования образцов представляет точка А, расположенная на границе двух стадий (2 , 3) и соответствующая моменту перехода к постоянной скорости деформирования образцов.

На основании данных анализа кривых ползучести породных образцов [6], построен график (рис. 2), где по оси абсцисс отложена образцов прочность породного образца, а по оси ординат время t_A.

По кривым ползучести образцов из ЭМ и зависимостей, приведенных в работах [5], построен сводный график (рис. 3) зависимости времени t_A от прочности эквивалентных материалов $R_{сж}$.

Полученные функции (рис. 2 и рис. 3) имеют затухающий характер и

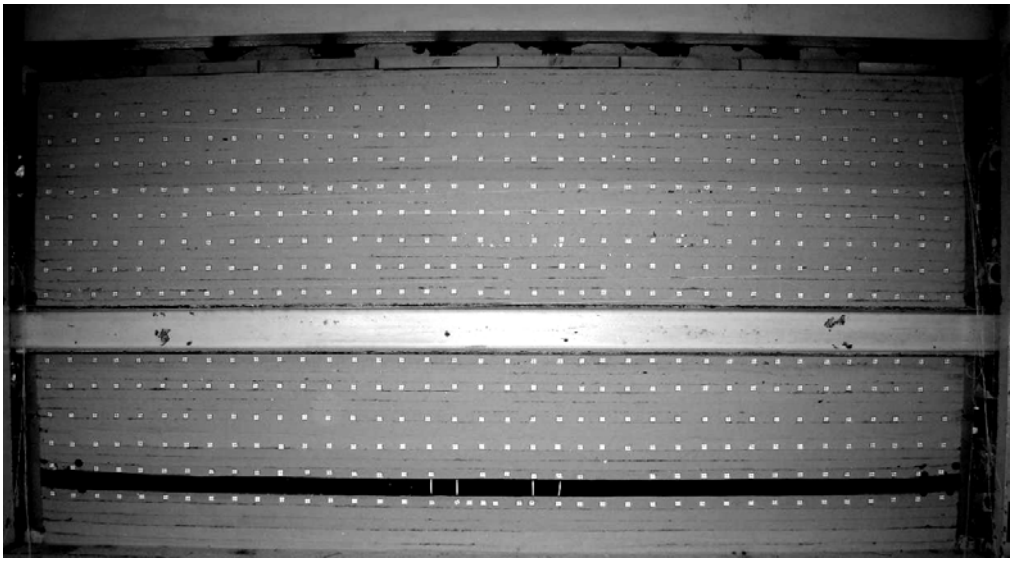

Рис. 4. Физическая модель горного массива

в общем случае могут быть аппроксимированы уравнением вида:

$$\mathbf{t_A = K / e^{f(R\ сж)}} \qquad (2)$$

где K - численный коэффициент, R сж - прочность на сжатие испытуемых породных образцов и образцов из ЭМ.

Анализ зависимостей, приведенных в работах [2, 5, 6], показывает, что положение точки А, характеризуемое координатами ε - t , зависит не только от прочности испытуемых образцов, но и от относительных напряжений $\boldsymbol{\sigma_z / R_{сж}}$.

При определении масштаба времени для медленно протекающих процессов в модели и натуре необходимо учитывать помимо зависимости (2) функцию интегрального реологического параметра среды, предложенного Г.Н. Кузнецовым в 1970 г. Этот параметр представляет собой отношение временного модуля деформации E_t, определяемого по деформации образца горной породы или ЭМ после стабилизации процесса ползучести во времени, и его мгновенного модуля деформации $E_{мг}$ [6].

Окончательно, время продолжительности процесса, протекающего в условиях натуры и модели, определится, соответственно, из следующих зависимостей [5]

$$t_н = 4128 / e^{R_н^{0,35}} \cdot (\sigma z_н / 0,4\ R\ сж_н) \cdot [\ln(E_{t,н} / E_{мг,н})^{-1}]^{0.25} \qquad (3)$$

$$t_м = 0,6 / R\ сж_м\ e^{0,03\ R\ сж\ м} \cdot (\sigma z_м / 4\ R\ сж_м) \cdot [\ln(E_{t,м} / E_{мг,м})^{-1}]^{0,25} \qquad (4)$$

Для определения прочности на сжатие ЭМ необходимо задаться геометрическим масштабом моделирования и тогда величина $R_{сж,м}$, будет равна:

$$Rсж_м = l / L \cdot \gamma_м / \gamma_н \cdot Rсж_н$$

Отсюда следует, что геометрический масштаб моделей **l/L** является одним из определяющих факторов при расчетах времени протекания реологических процессов в модели, при этом отношение $\mathbf{t_м / t_н}$ определяет масштаб времени.

Результаты анализа кривых ползучести образцов горных пород и материалов, эквивалентных горным породам, показали, что масштаб времени

при моделировании медленно протекающих процессов, является величиной переменной - функцией многих факторов, к которым, в первую очередь, относятся прочностные и деформационные характеристики моделируемого массива и самой модели, а также геометрический масштаб модели. Полученные расчетные формулы для определения масштаба времени дают возможность его направленно изменять, варьируя геометрическим масштабом, интегральными реологическими параметрами ЭМ, обоснованно соотносить темпы ведения моделируемых горных работ с изменением свойств ЭМ во времени и «переносить» данные моделирования на условия натуры.

Если за ключевой временной параметр принять положение точки А, то из рис. 2 и 3 следует, что в время ее достижения в натуре и модели в среднем отличаются в 30 – 50 раз. С учетом прочности ЭМ ($R_{сж}$ = 0,1 МПа) и данных в работе [5] при нагрузке 60% от разрушающей для достижения точки А требуется около 10 часов. Для того, чтобы процессы реологического деформирования не успели развиться, необходимо, чтобы моделирование процессов прохождения выработок не превышало 1 – 2 часов. В этом случае максимум эпюры опорного давления имеет наибольшую величину и максимально приближен к поверхности обнажения.

С учетом выбранного линейного масштаба моделирования 1:100, были подобраны эквивалентные материалы (ЭМ), обеспечивающие выполнение критериев подобия [2] Было испытано несколько сотен образцов и подобрана соответствующая рецептура ЭМ на основе мелкодисперсного кварцевого песка и эпоксидной смолы ДЭГ-1. Были учтены реальные прочностные и реологические характеристики материалов с учетом результатов испытаний образцов угольного пласта, вмещающих пород и средних коэффициентов структурных ослаблений (для перехода от показателя прочности в образце к массиву).

При изготовлении модели массив оснащался профильными линиями геометрического нивелирования и датчиками напряжений, заложенных на различных горизонтах (рис. 4).

Напряжения в массиве определялись с помощью микродатчиков МДГ-2 и МДГ-3 не препятствующих развитию геомеханических процессов при моделировании горных работ и устанавливаемых внутри моделей в процессе их изготовления.

Микродинамометры типа МДГ-2 и МДГ-3 (А.с. № 1208486, А.с. № 1778566) предназначены для определения напряжений, нормальных к рабочей поверхности мембраны в мелкодисперсных материалах с модулем упругости до 1000 МПа и с напряжениями до 1,5 МПа. Диаметр микродинамометра- 15мм, толщина- 1,5 мм. Геометрические и жесткостные параметры прибора обеспечивают как минимизацию его воздействия на поле напряжений в исследуемом материале, так и высокую точность измерений (в диапазоне от 0,01 до 1,5 МПа с надежностью 0,95 доверительные границы относительной погрешности измерений находятся в пределах 5% [2]). Указанные точностные параметры датчика обеспечиваются с учетом воздействия всех возможных влияющих факторов, действующих в лабораторных условиях: температуры (15-25 С), влажности (30-95%) и т.д. Расположенный в датчике интегральный тензомодуль мембранного типа 3х0,5 мм из кремния с кольцом жесткости и напыленными на нем по автоэпитаксиальной технологиями кремниевыми тензорезистора-

ми обеспечивает получение высокого выходного сигнала - 10mV на 1 V питания при номинальной нагрузке. Это обеспечивает простую стыковку микродинамометра со стандартными тензометрическимисс систеиами а также с АЦП - преобразователями для подключения к ЭВМ (ПК).

Датчики подключались к информационно-измерительной системе СИИТ-3, обеспечивающей опрос датчиков по внешнему сигналу с ПК со скоростью 30 измерений в секунду.

Схема расположения реперов (марок) и датчиков приведены на рис. 4.

На поверхности модели в кровле угольного пласта на 15 горизонтах были закреплены марки для оценки смещений отдельных элементов массива. Расстояния между марками, приведенные к условиям натуры, по вертикали и по горизонтали составляли от 5 до 10 м. Точность определения координат марки цифровой камерой типа CANON-620 с разрешением 7,1 МПС составила около 0,2 мм в модели или 20 мм в условиях натуры.

Реализация граничных условий обеспечивалась с помощью системы управления стендом и специального программного обеспечения, позволяющего формировать нагружение модели вертикальными и горизонтальными силовыми элементами в соответствии с заданными эпюрами нагрузок.

Работа программы осуществляется следующим образом: на компьютере устанавливаются параметры эпюры нагрузок на данном этапе, а также та или иная закономерность изменения скорости, необходимая для реализации оптимального режима регулирования вблизи заданной величины нагрузки по каждому из силовых элементов. После достижения заданной величины нагрузки (с заданной точностью) нагружение данного силового элемента приостанавливается. Когда заданная величина нагрузки достигается всеми элементами, система переводится в режим саморегулирования и поддержания заданной эпюры на прежнем уровне.

Обеспечение работы программы производится с помощью информационно-измерительной системы СИИТ-3, интерфейса И-1, платы ЦАП, платы АЦП, блока усилителей, силовых элементов ЭИМ.

Из 16 силовых элементов 8 расположены вертикально, а остальные горизонтально – по 4 с каждой стороны. Этому расположению СЭ соответствует интерфейс пользователя на экране монитора, позволяющего следить в режиме реального времени за процессами нагружения и разгрузки модели в соответствии с заданными эпюрами.

Результаты проведенных исследований показали, что комплекс разработанных методик и технических средств физического моделирования, включающих в себя новые эквивалентные материалы, устройства автоматического регулирования граничных условий, миниатюрные датчики напряжений - позволяет исследовать геомеханические процессы, происходящие в горном массиве, при использовании современных технологий разработки МПИ, характеризующихся высокими скоростями подвигания забоя, в сложных горно-геологических условиях с различными вариантами аномальных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.*Якоби О.* Практика управления горным давлением. Пер. с нем.– М.: Недра, 1987. – 566 с.

2. *Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., Шклярский М.Ф. и др.* Моделирование в геомеханике. М.:Недра, 1991, 240 с

3. *Воскобоев Ф.Н.* Управление горным давлением в щитовых забоях / Ф.Н Воскобоев, Н.А Шаповал, А.Т. Курносов. – Уголь, 1984. - № 10.

4. *Медведчук Н.Д.* Влияние скорости подвигания очистного забоя на проявление горного давления при выемке угольных пластов / Н.Д. Медведчук // Автореферат кандидатской диссертации. – Донецк, ДонУГИ, 1968.

5. *Определение масштаба* времени при моделировании медленно протекающих геомеханических процессов. Шклярский М.Ф. , Зуев Б.Ю. // Сб.научн.тр. "Горная геомеханика и маркшейдерское дело" СПб.: ВНИМИ, 1999 г. – С.35-39.

6. *Карташев Ю.М.* Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород. – Л.: Недра, 1973. – 111 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Зуев Б.Ю. – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, Санкт-Петербургский Государственный Горный Институт (ТУ), zuev_bu @spmi.ru

Коршунов Г.И. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БП и РГП Санкт-Петербургский Государственный Горный Институт (ТУ), bpigp@spmi.ru

Ютяев Е.П. – технический директор, ОАО «СУЭК» - Кузбасс, Loginov AK@suek.ru