УДК 622.235.622.272

Е.В.ЛОДУС, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник, (812) 328 82 09*
Е.В.ГОНЧАРОВ, *старший научный сотрудник, goncharovbox@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

E.V.LODUS, *Dr. in eng. sc., chief research assistant, (812) 328 82 09*
E.V.GONCHAROV, *senior research assistant, goncharovbox@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГООБМЕНА В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Причиной опасных динамических явлений типа горных ударов, землетрясений является энергообмен в массиве горных пород. Недоступность массива для прямых наблюдений вынуждает изучать проблему методами лабораторного моделирования. Описана сущность энергообмена в натуре, принципы его физического моделирования в лаборатории, оборудование и некоторые результаты исследований.

***Ключевые слова*:** горный массив, опасные динамические явления, энергообмен, разрушение горных пород, образцы горных пород, лабораторные испытания, физическое моделирование.

PHYSICAL MODELING OF ENERGY EXCHANGE IN ROCK MASS

The cause of manifestation of dangerous dynamic phenomena, such as rock bursts, earthquakes, etc., appears to be the energy exchange in rock mass. The inaccessibility of rock mass for carrying out the full-scale observations has stimulated to study this problem with using the methods of laboratory modeling. Description is given to the substance of energy exchange in situ, the principles of its physical modeling in the laboratory, to the test equipment as well as to some results of our investigations.

***Key words*:** rock mass, dangerous dynamic phenomena, energy exchange, rock failure, rock specimens, laboratory tests, physical modeling.

За последствия разрушения элементов горного массива, как теперь уже известно, отвечают энергообменные процессы. Массив нагружен гравитационными и тектоническими силами и эти силы деформируют горные породы упругопластически. Упругая составляющая деформации способна восстанавливаться, выполняя при этом работу. До восстановления упругой составляющей порода «заряжена» потенциальной энергией, которая переходит в кинетическую энергию при восстановлении упругой составляющей деформации.

Поскольку массив неоднороден, два соседних элемента массива переносят одинаковые силовые условия неодинаково. Периодически наступают моменты, когда один из элементов массива не выдерживает силового воздействия и разрушается. Тогда на соседнем элементе появляется возможность для восстановления упругих деформаций. Разрушение одного элемента и восстановление упругих деформаций другого элемента происходит одновременно и взаимосвязанно, потенциальная энергия восстанавливающегося элемента участвует в разрушении слабого элемента. Фактически потенциальная энергия одного элемента массива переходит в кинетическую энергию другого элемента, и в этом – суть энергообмена.

Для разрушения любого материального объекта требуется, как известно, определенная энергия. На рис.1 в координатах напряжение – продольная деформация общая энергия разрушения от сжатия равна площади под кривой ОАД и включает допредельную ОАБ и запредельную БАД части. Диаграммы подвижки и разрушения от сжатия в общих чертах подобны, поэтому анализ проводится только для разрушения сжатием. Главные события разворачиваются при запредельном деформировании, т.е. после достижения предела прочности в точке А. Кривая 1 показывает закономерность накопления упругой энергии до предела прочности материала.

Диаграммы 2 и 3 – варианты реализации энергии, накопленной в окружающих породах на момент достижения предела прочности разрушающимся элементом. От того, по какой из диаграмм будет реализована накопленная энергия, зависит величина этой энергии и финал энергообмена. Для диаграммы 2 накопленная энергия есть площадь фигуры АБЕ, для диаграммы 3 – площадь АБС.

Видно, что в одном случае (диаграмма 2) энергии накоплено намного больше, чем это нужно для окончательного разрушения образца (площадь АБЕ больше площади АБД). Для диаграммы 3 ситуация обратная: запасенной энергии недостаточно для разрушения образца только за счет энергии окружающих пород (площадь АБС меньше площади АБД). Значит, в первом случае разрушение будет иметь динамические последствия с выделением части накопленной энергии на динамические эффекты. На эти эффекты расходуется избыточная энергия $Э_д$, равная площади АДЕ. Во втором случае разрушение за пределом прочности может реализоваться только при подведении дополнительной «машинной» энергии, а это происходит в управляемом режиме без динамических эффектов. «Машинной» энергией $Э_м$ называют работу, совершаемую горной машиной или с помощью взрыва, направленную на разрушение породы. В данном примере она равна площади АСД.

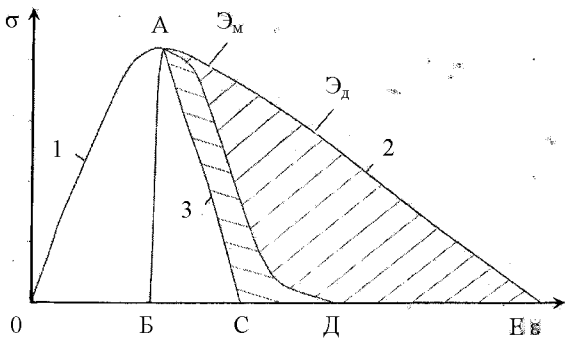


Рис.1. Энергообмен при вязком и хрупком вариантах разрушения

Ситуация с диаграммой 2 при избытке энергии $Э_д$ характеризуется тем, что модуль разгрузки АЕ окружающих пород меньше усредненного запредельного модуля спада АД разрушаемого элемента. Это – энергообмен при мягкой системе нагружения. Если модуль разгрузки АС больше запредельного модуля АД, то энергообмен проходит при жесткой системе нагружения.

Говорить об опасности динамических эффектов энергообмена излишне. Несмотря на многолетнюю известность этих явлений и их активное изучение, с пугающей регулярностью продолжают поступать сообщения об ужасных катастрофах на шахтах из-за горных ударов и на поверхности из-за землетрясений. Это однозначно указывает на необходимость продолжать изучение проблемы, причем более основательно, с детальным вскрытием физики собственно процесса энергообмена.

Принципиально невозможно изучать энергообмен непосредственно в массиве горных пород. Массив практически недоступен для прямых наблюдений, поскольку очаги формирования энергообмена располагаются в глубине массива, в заранее неизвестном месте, причем процесс может иметь катастрофические последствия. Исследовать физику энергообмена и детали процесса можно только методами физического моделирования в лабораторных условиях.

Достоверность перехода от лабораторных исследований на массив тем выше, чем более полно воспроизводятся натурные условия в лабораторных опытах. Необходимо, чтобы максимально соответствовали друг

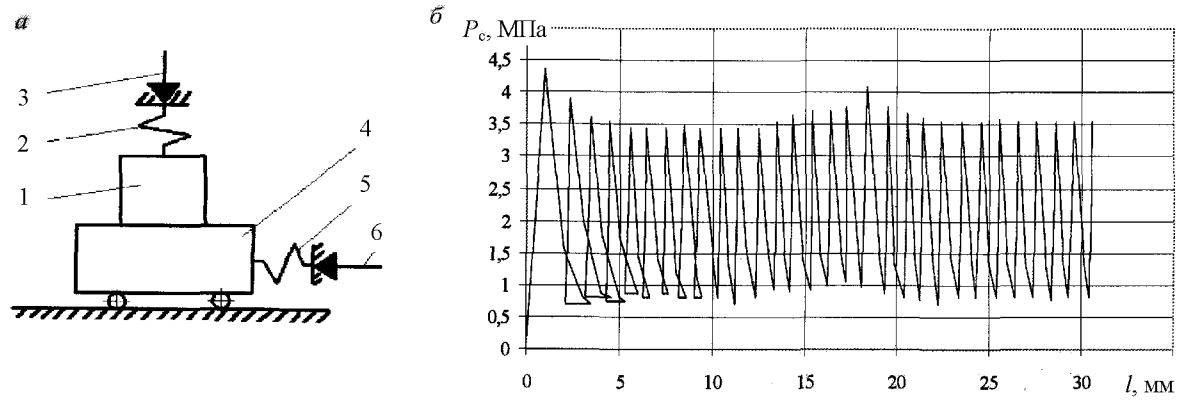


Рис.2. Схема испытаний (*а*) и диаграмма развития динамических подвижек (*б*) на соляных образцах Солигорска

другу материальные и силовые условия энергообмена в натуре и в лаборатории.

Материальные условия моделирования состоят в том, что испытуемые образцы и физические контакты между ними должны точно соответствовать моделируемому участку блочного массива, а именно, образцы должны воспроизводить соответствующие блоки по физико-механическим свойствам, а контакты между ними подходить контактным условиям между блоками.

Силовые условия моделирования состоят в том, что образцы рассматриваются как элементы массива в очаге зарождения и реализации энергообмена, а испытательное оборудование – как окружающие породы. В функции оборудования входит воспроизведение соответствующих реальных режимов нагружения и энергетических запасов.

Элементы горного массива (блоки, слои) не только разрушаются путем разделения на части от сжимающих или изгибающих сил, или от среза рабочим органом горной машины, но и взаимно перемещаются друг относительно друга. Разделение на части и взаимное перемещение (подвижки) часто происходят одновременно. Разделение на части исследовано сравнительно подробно, и даже специально для изучения условий хрупкого разрушения*. Подвижки исследованы значительно меньше по объему и совсем упрощенно по воспроизведению реальных ситуаций**.

Испытательное оборудование, разработанное авторами, состоит из нескольких стендов.

Стенд «Подвижка» предназначен для моделирования энергообмена при взаимных смещениях элементов горного массива, а также при разрушении сжатием и при разрушении срезом (рис.2).

Образцы 1 и 4 прижаты друг к другу нагружателем 3 и смещаются относительно друг друга сместителем 6. Передача прижимных и сдвигающих усилий производится через энергонакопители 2 и 5. Разработаны и применяются гидравлические и пружинные энергонакопители порознь или совместно, что позволяет в широких пределах регулировать как запас энергии, так и диаграмму реализации энергии. При необходимости в систему прижатия или смещения устанавливают мультипреобразователь для инициирования подвижек ударными импульсами. Каждый их пиков на диаграмме (рис.2, *б*) характеризует динамическую подвижку с сильным звуковым эффектом и сотрясением стенда. В масштабах соляного рудника это были бы явления типа горных ударов. Частота пиков во времени регулируется скоростью роста сдвигающего усилия.

* *Ставрогин А.Н.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1985. 271 с.

Stavrogin A.N. Rock Strength and Stability of Mine Workings at Great Depths / A.N.Stavrogin, A.G.Protosenya. M.: Nedra, 1985. 271 p.

** *Соболев Г.А.* Физика землетрясений и предвестники / Г.А.Соболев, А.В.Пономарев. М.: Наука, 2003. 270 с.

Sobolev G.A. Physics of Earthquakes and Precursors / G.A.Sobolev, A.V.Ponomarev. M.: Nauka, 2003. 270 p.

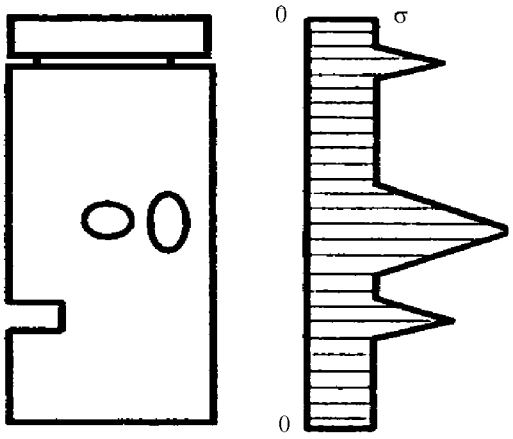


Рис.3. Схема моделирования техногенного внедрения

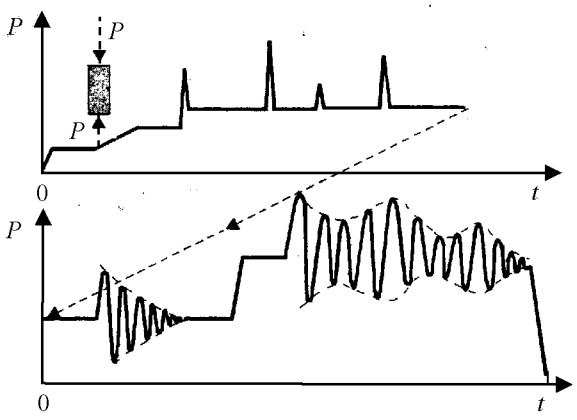


Рис.4. Силовые возможности стенда «Режим»

Стенд «Внедрение» предназначен для моделирования энергообмена при имитации техногенного внедрения в нагруженный горный массив. На рис.3 слева показан образец с выполненными в нем отверстиями и пропилами, справа – диаграмма распределения напряжений по разным сечениям по высоте образца.

Отверстия и пропилы выполняются в нагруженном образце независимо друг от друга, располагаются под разными углами в разных местах по длине образца и имеют разные размеры. Решается двойная задача – исследуется энергообмен в зоне работы разрушающего инструмента и определяются оптимальные режимы работы разрушающего инструмента в нагруженной горной породе.

Стенд «Режим» предназначен для моделирования энергообмена при воспроизведении сложной последовательности изменения силовых режимов работы элемента горного массива. На рис.4 показаны возможности силовой работы стенда как изменения нагрузки P во времени t.

Стенд «Режим» обеспечивает плавное увеличение или снижение нагрузки, длительную постоянную нагрузку, ступенчатые ударные пригрузки, ударные импульсы, одноцикловые и двухцикловые затухающие колебания, условно мгновенную разгрузку. Главная особенность стенда состоит в том, что чередование нагрузок в любой последовательности проводится без разгрузки образца, как это происходит с элементами горного массива.

В дальнейшем комплекс будет дополнен устройствами для непрерывной синхронной регистрации акустической и электромагнитной эмиссий.

Исследовательский комплекс «Энергообмен» в 1996 г. удостоен золотой медали на Всемирной выставке изобретений «Эврика», Брюссель, Бельгия.