

**Б.Ю. Зуев, А.И. Пальцев**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Представлены результаты развития метода моделирования на эквивалентных материалах за последние годы, позволившие значительно дополнить возможности физического моделирования для комплексного применения совместно с натурными и математическими методами при решении ряда актуальных нелинейных задач горной геомеханики.*

*Ключевые слова: методы и средства физического моделирования, эквивалентные материалы, сложные горно-геологические условия.*

**Н**аибольшие сложности при исследовании геомеханических процессов в горных массивах при подземной разработке полезных ископаемых возникают в случаях, когда для решения поставленных задач необходимо учесть целый комплекс сложных горно-геологических условий и схем отработки полезных ископаемых. К таким условиям могут быть отнесены: блочная иерархическая нарушенность массива, большая глубина залегания месторождения, подвижки блочных структур и по разломам, динамические процессы с образованием новых трещин и разломов, наличие газового фактора, изменение граничных условий на границах исследуемой области массива, связанные с влиянием горных работ на соседних участках, и изменением параметров пород во времени, обрушение пород в выработанное пространство с образованием новых блоков и многое другое.

Решение таких нелинейных задач с помощью натуральных экспериментальных методов исследований позволяют получать наиболее достоверную ин-

формацию о параметрах НДС в зонах массива, непосредственно прилегающих к выработкам, и обеспечивают текущий прогноз. Однако натурные методы исследования связаны с большими материальными затратами и с недоступностью глубинных областей массива, со сложностью выделения исследуемых влияющих факторов на фоне других. Эти методы не дают возможности изучить НДС во всей области в массиве горных пород и выявить общие закономерности их формирования и развития, что крайне важно для прогнозирования всей ситуации в целом, так как при этом из анализа практически «выпадает» область массива от выработок до дневной поверхности и до соседних боковых пород, которые оказывают определяющее влияние на формирование напряженно-деформированного состояния в окрестности выработок.

Математические методы, в том числе и методы математического моделирования, сталкиваются с серьезными препятствиями, связанными с наличием комплекса факторов, существенно усложняющих горно-геоло-

гические условия: нелинейными реакциями массива на природные и техногенные воздействия и необходимостью учета разрывов его сплошности, развития процесса во времени, резких динамических процессов при подвижках блочных структур и как следствие - с требованием учета постоянно изменяющихся граничных условий на контактах блоков и вероятностно-статистическим характером формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. 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.

Традиционные методы физическо-го моделирования на эквивалентных материалах [1, 2] базируются на теории подобия, теории размерности и состоят в воспроизведении в определенном масштабе структуры и физико-механических характеристик массива, реального процесса добычи полезного ископаемого на заданной глубине залегания, определении качественных и количественных характеристик напряжений и деформаций в массиве, получении физической картины процессов сдвижения на раз-

личных горизонтах. Ключевую роль в обеспечения подобия моделируемых процессов играют сами эквивалентные материалы, при выборе которых за основу чаще всего берут критерии прочностного или деформационного подобия. Однако данный подход не позволяет решать ряд нелинейных задач геомеханики при моделировании реальных процессов, протекающих в условиях взаимодействия различных физических и геофизических полей, энергообмена между различными структурными элементами массива.

В данном докладе рассмотрен комплекс новых эквивалентных материалов, позволяющих значительно расширить область моделируемых явлений.

### **1. Разработка новых типов ЭМ на основе критерия энергетического подобия и параметров типовых горных пород для моделирования динамических процессов**

Накапливаемая упругая потенциальная энергия элемента массива определяется по известной формуле [3]:

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon V,$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  - напряжение и относительная деформация элемента в условиях одноосного напряженного состояния,  $V$  - его объем.

Определим коэффициент подобия (или переходной множитель) энергии в модели и натуре

$$\alpha_W = \frac{W_m}{W_n} = \frac{\sigma_m \cdot \varepsilon_m \cdot V_m}{\sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot V_n} = \alpha_\sigma \alpha_\varepsilon \alpha_v = \alpha_\sigma \alpha_\varepsilon \alpha_L^3.$$

При условии одновременного обеспечения подобия механических напряжений и процессов упругих деформаций

$$\alpha_\sigma = \alpha_\varepsilon = \alpha_p \alpha_L,$$

где  $\alpha_E$  - коэффициент подобия модулей деформации,  $\alpha_\rho = \alpha_\gamma$  - коэффициент подобия плотностей и весов,

тогда

$$\alpha_E = \frac{\sigma \cdot E}{\sigma \cdot E} = \frac{\alpha_\sigma}{\alpha_E} = \frac{\alpha_\rho \alpha_L}{\alpha_\rho \alpha_L} = 1$$

$$\alpha_W = \alpha_\rho \alpha_L^4,$$

а коэффициент подобия удельной потенциальной энергии

$$\alpha_{W_{уд}} = \frac{\alpha_\rho \alpha_L^4}{\alpha_v} = \frac{\alpha_\rho \alpha_L^4}{\alpha_L^3} = \alpha_\rho \alpha_L$$

Таким образом, коэффициенты подобия напряжений, модулей деформаций и удельных упругих энергий оказываются идентичными:

$$\alpha_W = \alpha_\sigma = \alpha_E$$

В случае объемного напряженного состояния ЭМ общая энергия состоит из энергии формоизменения и энергии, накапливаемой при сжатии тела [4]:

$$W_\Sigma = W_\Phi + W_V$$

$$W_\Phi = \frac{1+\nu}{3E} \sigma^2$$

$$W_V = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$$

Анализ этих формул показывает, что при условии  $\nu_M \approx \nu_H$ , также обеспечивается равенство

$$\alpha_\sigma = \alpha_E = \alpha_W = \alpha_\rho \alpha_L$$

Накопленная упругая потенциальная энергия может реализовываться в виде энергии падающих тел; кинетической энергии разлетающихся блоков, элементов массива; упругих волн.

На основе общей теории подобия и размерностей [1] формулы размерностей для энергии в условиях модели и натуре можно записать в виде  $W_M = M_M L_M^2 T_M^{-2}$ ;  $W_H = M_H L_H^2 T_H^{-2}$  а коэффициент подобия энергии  $\alpha_W = \alpha_M \alpha_L^2 \alpha_T^{-2}$ , где  $\alpha_M = M_M/M_H$ ;  $\alpha_L = L_M/L_H$ ;  $\alpha_T = T_M/T_H$ .

Как показано в работе [2] для процессов, развивающихся под действием сил тяжести, равномерно ускоренных движений в жестко-пластичных элементах, распространения упругих волн, коэффициент подобия определяется по одной и той же формуле:

$$\alpha_T = \sqrt{\alpha_L}, \text{ тогда, учитывая, что}$$

$$\alpha_M = \alpha_\rho \alpha_V; \alpha_W = \alpha_M \alpha_L^1 = \alpha_\rho \alpha_L^3 \alpha_L^1 = \alpha_\rho \alpha_L^4, \alpha_{W_{уд}} = \alpha_\rho \alpha_L.$$

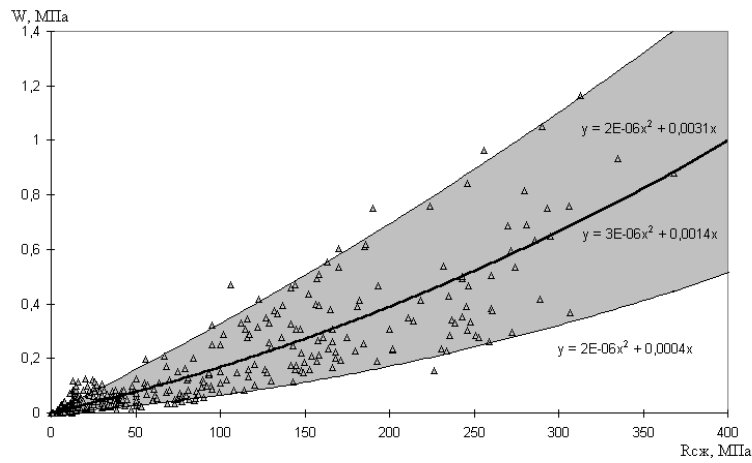
В итоге - при условии  $\alpha_\sigma = \alpha_E = \alpha_\rho \alpha_L$ ;  $\nu_M = \nu_H$  обеспечивается подобие всех основных составляющих механического энергетического баланса между энергией, аккумулируемой деформированными упругими телами и энергией перемешивающихся в пространстве элементов массива под влиянием их силового взаимодействия и гравитационных сил:

$$W_{уд_{мод}} = \alpha_\rho \alpha_L W_{уд_{нат}}$$

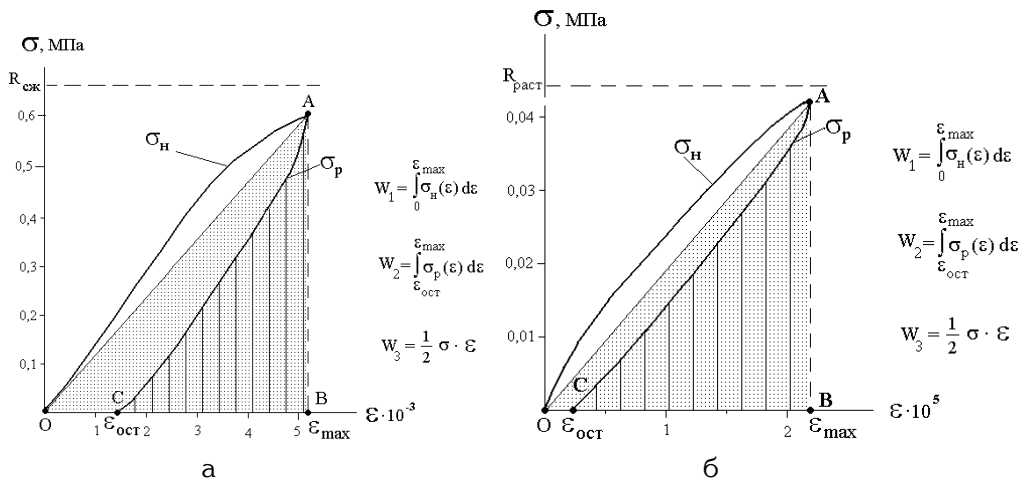
Используем это соотношение для разработки ЭМ с физико-механическими параметрами, обеспечивающими выполнение условий подобия для самого широкого круга горных пород. На рис. 1 приведены результаты анализа зависимостей максимальной удельной энергоёмкостью  $W_{уд_{м}}$  от  $R_{сж}$ , полученные по результатам одноосных испытаний, проведенных различными авторами [3, 5, 6 и др.], более 500 образцов 20 типов горных пород (углей, песчаников, аргиллитов, алевролитов и т.д.). Величина  $W_{уд_{м}}$  рассчитывалась по результатам стандартных программ испытаний:  $R_{сж}$ ,  $E_{упр}$  [3]:

$$W_{уд} = \frac{1}{2} \frac{R_{сж}^2}{\hat{\Gamma}_{-p}}$$

Более точное определение  $W_{уд}$  - по площади в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$  для большинства горных пород было невозможно из-за отсутствия соответствующих экспериментальных данных.



**Рис. 1. Зависимость максимальной удельной энергоемкости  $W_{уд\ m}$  от  $R_{сж}$**

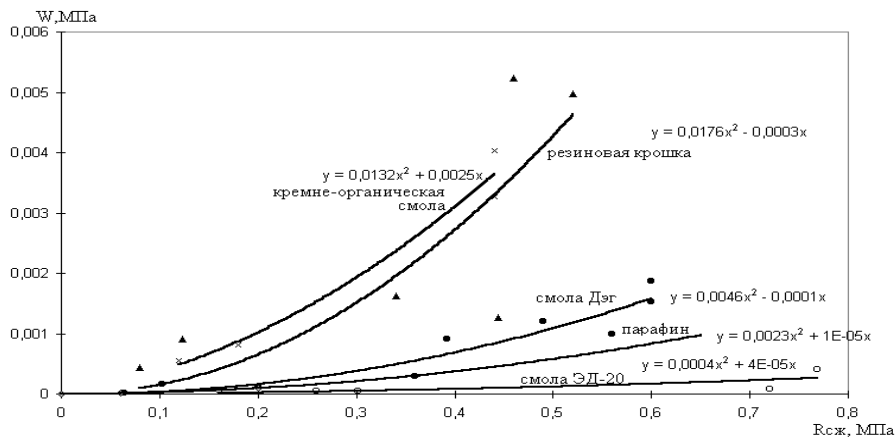


**Рис. 2. Зависимость  $R_{сж}$  от  $\epsilon$  для ЭМ при сжатии и растяжении**

Анализ расположения экспериментальных точек в координатах  $W_{уд}$  -  $R_{сж}$  показывает, что они располагаются в сравнительно узкой, заштрихованной на рисунке, области с центральной линией  $W_{уд} = 3E-06 R_{сж}^2 + 0,0014 R_{сж}$ .

При анализе энергетических параметров ЭМ варьировалась их рецептура с двумя видами мелкодисперсных наполнителей: кварцевого песка,

резиновой крошки и четырьмя типами связующих: кремнийорганической смолы, смол ДЭГ-1, ЭД-20 и парафина. В результате изменения их процентного соотношения были получены различные прочностные, деформационные, энергетические параметры для 5 типов ЭМ: П-Кр (кварцевый песок + кремнеорганическая смола), П-Р-Эа (кварцевый песок + резиновая крошка+эпосилифатическая смола),



**Рис. 3. Зависимость удельных энергоемкостей ЭМ от  $R_{сж}$**

П-Эа (кварцевый песок + эпоксиалифатическая смола) П-П (кварцевый песок + парафин), П-Эд (кварцевый песок + эпоксидная смола).

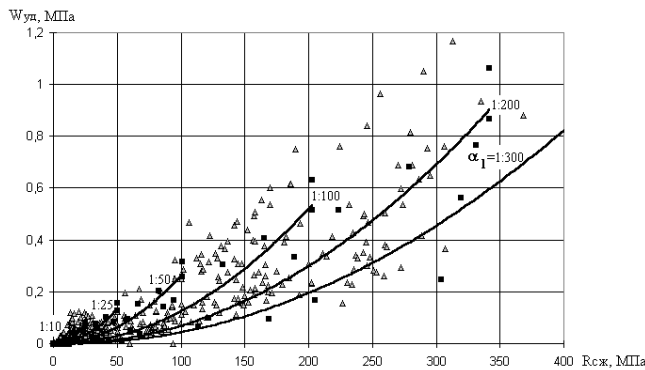
Результаты испытаний одного из типов ЭМ (П-Эа) при одноосном сжатии представлены на рис. 2, а, при одноосном растяжении - на рис. 2, б. Зависимости удельных энергоемкостей всех исследованных типов ЭМ от напряжений приведены на рис. 3.

Оценка процессов энергообмена может быть произведена с помощью показателя  $K_W = W_2 / (W_1 + W_2)$ , характеризующего отношение отдаваемой образцом упругой энергии - к суммарной поглощаемой им энергии, идущей на его деформирование (рис. 2). Сравнительный анализ значений  $K_W = W_2 / W_3$  для расчетных величин  $W_3 = 0,5\sigma\epsilon$  и фактических значений  $K_W$  от относительных напряжений  $\sigma / R_{сж}$  для различных типов ЭМ показывает, что в диапазоне  $\sigma / R_{сж} = 0,1 \div 0,9$  в обоих случаях  $K_W$  уменьшается в среднем с  $0,8 \div 0,9$  до  $0,6 \div 0,7$ .

С учетом коэффициентов энергетического подобия для масштабов от 1:300 до 1:10 экспериментальные

точки и построенные по ним зависимости для ЭМ были перенесены на поле распределения удельных энергоемкостей образцов горных пород в координатах  $W_{уд} - R_{сж}$ . Анализ полученных результатов показал, что в наибольшей степени условиям энергетического подобия соответствуют материалы на основе эпоксиалифатической смолы (ДЭГ-1) и мелкодисперсного кварцевого песка (рис. 4), позволяющего для совокупности различных масштабов (1:300 - 1:10), воспроизвести практически все основные типы горных пород с прочностью  $R_{сж} = 1 - 400$  МПа.

Приведенные зависимости  $W_{уд} = f(R_{сж})$  предназначены прежде всего для определения типов ЭМ, обеспечивающих наиболее точное воспроизведение максимальных энергоемкостей тех или иных областей массива, сложенных из различных типов горных пород. При анализе процессов энергообмена между ними следует учитывать, что в до предельных режимах ( $\sigma < R_{сж}$ ) как для горных пород, так и для ЭМ -  $E_{упр} \approx const$  и зависимость  $W_{уд} = f(\sigma)$  имеет квадратический характер:  $W_{уд} \equiv \sigma^2$ .



**Рис. 4. Зависимость удельных энергоемкостей ЭМ от  $R_{сж}$  в поле расположения экспериментальных значений  $W_{уд}$  натуральных горных пород**

Примеры таких зависимостей приведены на рис. 4. Для воспроизведения на моделях динамических явлений в горных массивах, очевидно, необходимо использовать ЭМ с похожими удельными энергонакоплениями, как при сжатии, так и при растяжении. Оценка, как этих параметров, так и критериев хрупкого разрушения, может быть дана по величине отношения  $X_n = R_{сж}/R_{раст}$  [7]. Для большинства твердых горных пород  $X_n$  обычно принимается равным 10 при фактических колебаниях от 5 до 30 [6], что соответствует диапазону изменения показателя  $X_n$  для испытанных ЭМ: от 8 до 17.

## **2. Разработка новых типов ЭМ для моделирования шовных зон между блочными структурами и зон контакта разломов**

Для воспроизведения не только сплошных элементов массива [2], но и сместителей с заполнителями шовных зон и прилегающих к нему зон трещиноватости с учетом критериев подобия необходимо было разработать новые типы ЭМ.

Необходимость воспроизведения подобных физико-механических свойств этих зон связана с тем, что

свойства блочного массива и его устойчивость к различным воздействиям (в том числе и слабым) в значительной степени определяется параметрами его наименее прочной части - контактной области. Эти воздействия могут привести к нелинейным выходным "откликам" массива и выделению ранее накопленной энергии, существенно превышающую входную поглощенную энергию [3, 4].

В работе [5] приведены примеры "заполнителей"

для широкого класса различных разрывных нарушений. Установлено, что "швы" между контактирующими блоками могут быть либо плотно сжаты (зашемлены), либо раскрыты, либо (в большинстве случаев) заполнены глинистым материалом, сланцами, кальцитами или брекчированными породами. Мощность "швов" обычно составляет величины от нескольких миллиметров до 0,5 м, хотя при увеличении размеров блоков, образованных "старыми" разломами, ширина зоны дробления пород в области "шва" может достигать 5 м и более [5, 6].

Анализ физико-механических характеристик "заполнителей", проведенный в работах [1,2,5,7], позволил установить диапазоны изменения их основных параметров: плотности  $\rho$  - от 1500 до 2250 кг/м<sup>3</sup>, сцепления  $C$  - от 0,01 до 1 МПа, скорости распространения продольных волн  $c_n$  - от 50 до 1000 м/с. Расчетным путем установлен диапазон изменения модулей упругости  $E$  - от 38 до 5800 МПа. В работе [7] дана сравнительная оценка средней прочности "заполнителя"  $R_{сж}$ , составляющей величину порядка 0,01 от средней прочности блоков горных пород.

№ п/п	Физико - механические параметры	Моделируемый тип ЭМ	
		I	II
1	Состав компонентов ЭМ	кварцевый песок+ солидол (100:1,5)	кварцевый песок+ солидол+веретенное масло (100:1:5)
2	Условия перемешивания смеси ЭМ	без подогрева	с подогревом до 40 <sup>0</sup> С
3	Сцепление <b>C</b> , МПа	1,9 · 10 <sup>-4</sup>	4,2 · 10 <sup>-4</sup>
4	Угол внутреннего трения ( <b>tgφ</b> )	30 <sup>0</sup> (0,58)	26 <sup>0</sup> (0,49)
5	Модуль деформации, МПа	0,69	0,62
6	Коэффициент Пуассона	0,3	0,3

Диапазоны аналогичных параметров ЭМ составляют:  $\rho = 1500 - 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $C = 0,003 - 0,25$  МПа,  $E = 16 - 2000$  МПа,  $R_{сж} = 0,008 - 0,9$  МПа.

Таким образом на моделях с помощью известных типов ЭМ можно воспроизвести требуемый диапазон **C** лишь в масштабе  $\alpha_1$  не менее 1: 3,3; **E** - 1: 2,4, что не соответствует диапазону используемых масштабов моделирования  $\alpha_1 = 0,002 - 0,05$ .

Для обеспечения моделирования "заполнителей" с параметрами, близкими к нижним границам диапазонов, были разработаны новые типы ЭМ с тремя комбинируемыми типами связующих: вязкого солидола, пастообразного вазелина, жидкого веретенного масла. В качестве наполнителя - использовался мелкозернистый кварцевый песок и барит.

В результате проведенных исследований были отобраны два типа эквивалентного материала, воспроизводящего свойства глинистых заполнителей с наиболее часто используемым диапазоном масштабов моделирования  $\alpha_1 = 0,005 - 0,02$  (см. таблицу)

Прочностные и деформационные параметры приведенных типов ЭМ на порядок меньше, чем аналогичные параметры используемых эквивалентных материалов, что позволяет существенно расширить диапазон масштабов моделирования глинистых наполнителей.

### 1.3 Разработка новых типов ЭМ для моделирования деформирования углетановой толщи и вмещающих пород при ее дегазации

Разработанные методы моделирования на эквивалентных материалах позволяют исследовать НДС в горном массиве путем воспроизведения на моделях его структуры и основных физико-механических параметров: прочностных и деформационных параметров горных пород, сцепления и т.д.

Необходимость исследования перераспределения НДС в массиве вокруг выработки с учетом процессов дегазации требует разработки принципиально новой методики моделирования, включающей в себя:

- 1) разработку ЭМ, позволяющего моделировать процесс газовыделения из пласта при прохождении в нем выработки,
- 2) создание методики воспроизведения на модели процессов газовыделения из пласта при прохождении в нем выработки.

В естественных условиях природный газ, основу которого составляет метан, находится в угольных пластах в адсорбированном состоянии. Газоносность пластов достигает 30-40 м<sup>3</sup>/т. Помимо метана пласты содержат побочные продукты метаморфизма – CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Все они находятся в пустотах пласта самого различного

размера – от микропор в несколько ангстрем до больших трещин в пласте, причем физическое состояние изменяется от раствора до свободной газовой фазы.

Пористая структура угля как коллектора метана, углекислоты и воды формируется в несколько стадий. Первоначально создается коагуляционная структура с зазорами между глобулами. Затем под давлением вышележащих пород и адгезионных сил пустоты-зазоры смыкаются, и уголь превращается в конденсационную дисперсную структуру. Газообразование и удаление летучих веществ вновь создает пустоты в угле, но значительная часть образовавшегося газа задерживается в угле благодаря сорбционными силами.

Таким образом, в основе удерживания газа в угольных пластах и газовыделения из них лежат адсорбционные и десорбционные явления. Образующийся в результате разложения растительных остатков без доступа воздуха под большим давлением, метан удерживается на поверхности пор и пустот угля. Уголь, как адсорбент, удерживает молекулы метана в основном на принципах физической адсорбции, т.е. не образуя химических соединений. Такая адсорбция обуславливается тремя составляющими межмолекулярного притяжения – дисперсионным, ориентационным и индукционным взаимодействиями. Все они основаны на формировании дипольных частиц и притяжении диполей по электростатическому принципу. Энергия межмолекулярного взаимодействия уменьшается с повышением температуры. Это определяет протекание десорбционных процессов при создании соответствующих условий.

Для воспроизведения процессов адсорбции и десорбции газа на угле

мы предлагаем использовать модель процессов адсорбции и десорбции водяных паров из атмосферы, на солях, способных образовывать кристаллогидратные соединения. Прочность связи между основным веществом и кристаллизационной водой может быть различной. Многие из кристаллогидратов теряют кристаллизационную воду уже при комнатной температуре. Процесс обезвоживания существенно интенсифицируется при нагревании, т.е. варьируя температуру, его можно регулировать. Другим влияющим фактором является атмосферная влажность: чем она выше, тем сильнее идет образование кристаллогидрата, и наоборот – медленнее протекает потеря воды.

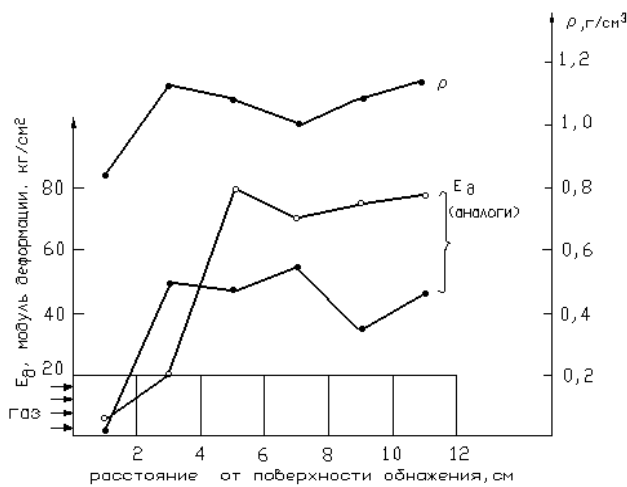
В основе формирования кристаллогидратных соединений и их выветривания лежат силы ионного (дипольного) взаимодействия соли (ион) и воды (диполь), т.е. силы электростатической природы. Это роднит эти системы с системой "уголь – газ", давая основания использовать их для воспроизведения процессов адсорбции и десорбции метана в угле.

Из существующего набора кристаллогидратных солей (КС) нами выбраны соль, содержащая кристаллизационную воду в количестве до 10 молекул на 1 молекулу соли. В обезвоженном виде она представляет собой порошок белого цвета с плотностью  $2,37 \text{ г/см}^3$ , а в виде кристаллогидрата –  $1,73 \text{ г/см}^3$ .

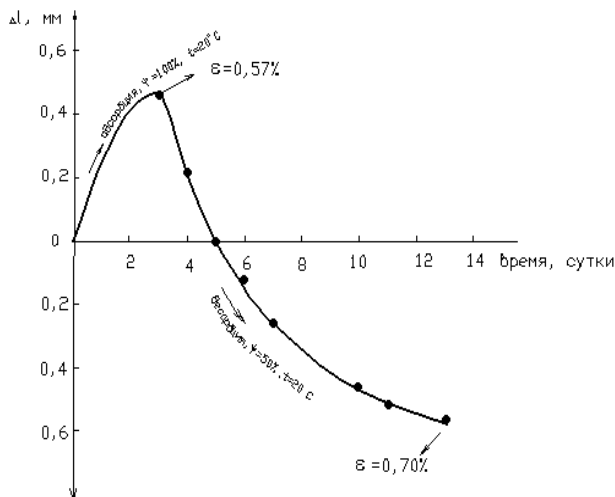
#### **Рецептура и технология изготовления материала**

В качестве связующего компонента кристаллогидратной соли определена эпоксидная алифатическая смола, модифицированная глицерином и отверждаемая полиэтиленполиамином. Последовательность операций выглядит следующим образом. Сначала приготавливают смесь смолы и глице-





**Рис. 5. Фильтрация флюида через толщу материала**



**Рис. 6. Деформация образца в процессе адсорбции и дегазации для ЭМ на основе КС**

рина, в которую добавляют полиэтиленполиамин. Вся эта композиция сразу после совмещения всех указанных компонентов начинает саморазогреваться, поэтому перемешивание все время контролируется термометром. При достижении температуры  $40^{\circ}$  перемешивание прекращают и композицию выливают в порошок КС.

Их активно перемешивают в течение 10 минут, добываясь растирания комкообразных структур. По достижении этой цели смесь готова к укладке в опалубку и уплотнению путем укатки или трамбовки.

*Рецептура материала:*

кристаллогидратная соль – 10 кг,  
эпоксидная смола ДЭГ-1 – 171 г,  
глицерин – 85,5 г,  
полиэтиленполиамин – 52 г.

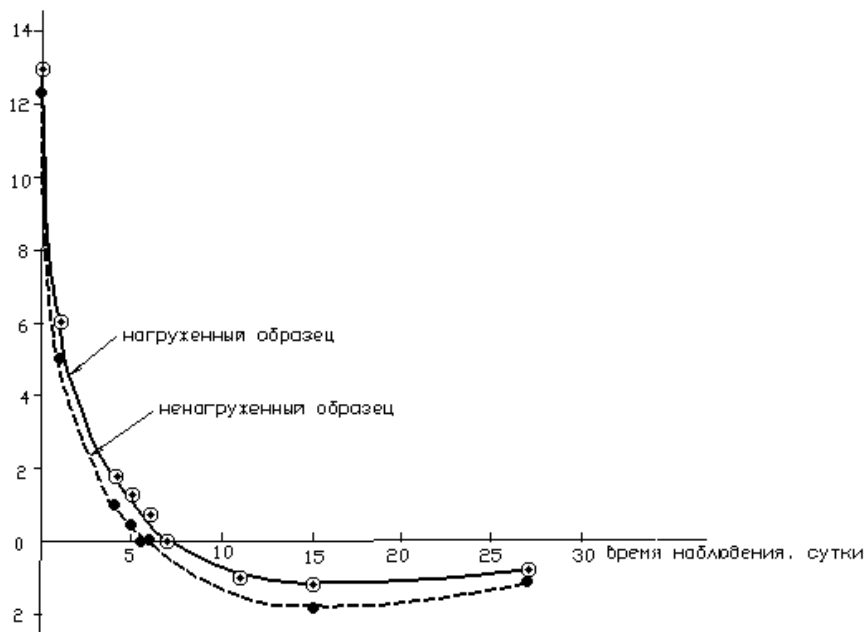
Для воспроизведения вмещающих пород в соответствии с поставленной задачей выбран песчано-цементный материал, обладающий независимостью свойств от атмосферной влажности.

*Рецептура материала:*

песок – 10 кг,  
цемент – 1,4 кг,  
вода – 1,0 кг.

Технология изготовления этого материала традиционна: песок перемешивается с цементом и к полученной смеси добавляется вода. После повторного перемешивания смесь готова к укладке.

Кристаллогидратный материал имеет различные свойства в зависимости от степени газонасыщения. При полном отсутствии газа (состояние десорбции) прочность на одноосное сжатие составляет 0,4 МПа, в трехосном напряженном состоянии она в два раза выше. Модуль упругости равен 17,0 МПа (при одноосном режиме испытаний) и 31,0 МПа (при трехосных испытаниях).



**Рис. 7. Кривые газотдачи в образце под нагрузкой ( $\sigma=0,1\text{кг/см}^2$ ) и отсутствии нагрузки**

В газонасыщенном (адсорбированном) состоянии прочностные и деформационные показатели существенно ниже. Прочность на одноосное сжатие составляет  $0,1\text{ МПа}$ , на трехосное –  $0,2\text{ МПа}$ . Модули упругости соответственно равны  $3\text{ МПа}$  и  $6\text{ МПа}$ .

Произведена оценка глубины проникновения флюида (газа, воды) через свободную поверхность материала. На рис. 5 приведен график изменения деформационных параметров и плотности при поглощении через поверхность площадью  $4\text{ см}^2$ . Как видно, это изменение происходит до расстояния около  $3\text{ см}$ .

Изучена степень адсорбции газобразного вещества в массу эквивалентного материала и обратный этому процесс – десорбция поглощенного флюида в атмосферу. На рис.6 представлена зависимость деформации образца в зависимости от условий

взаимодействия образца с окружающей средой.

Видно, что при влажности  $100\%$  и комнатной температуре за счет адсорбции деформация выросла от  $0$  до  $0,57\%$ . Обратный процесс – десорбция – при этой же температуре и влажности  $50\%$  привел к восстановлению образца к первоначальному размеру в течение пяти суток, а за последующие  $8$  суток процесс сокращения продолжился за счет истечения того количества флюида, которое сохранилось в исходном материале.

Рассмотрена зависимость дегазации из материала в зависимости от величины нагрузки, приложенной к образцу. На рис. 7 приведены зависимости степени адсорбции от времени для нагруженного и ненагруженного образцов. Условия десорбции –  $20^\circ$  (температура) и  $50\%$  (влажность). Как видно, в ненагруженном виде десорбция протекает быстрее и до

большей глубины. Завершается процесс истечения флюида на 10-12 сутки.

Разработанные новые эквивалентные материалы позволяют решать с помощью метода физического моделирования новые задачи, позволяя

исследовать процессы с учетом не только твердой, но и жидкой и газообразной фазой вещества, изучать подвижки блочных иерархических структур, исследовать как медленно, так и быстро текущие процессы, сопровождаемые волновыми явлениями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. - 432 с.
2. Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., Шклярский М.Ф. и др. Моделирование в геомеханике. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
3. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1973. - 286 с.
4. Падуков В.А. Горная геомеханика : Учеб.пособие / Санкт-Петербургский горный ин-т . СПб, 1997. 137 с
5. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. Недра, М., 1985
6. Карташов Ю.Н., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород - М., Недра, 1979, 269 с
7. Лодус Е.В. Энергообмен при деформировании и разрушении горных пород. Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук / ВНИМИ; СПб, 1993 - 37 с. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Зуев Б.Ю. – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, Санкт-Петербургский Государственный Горный Институт (ГУ), zuev\_bu @sprni.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
<b>МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
КАСАТКИН Андрей Аркадьевич	Выбор основных параметров линейной части крутонаклонного конвейера с прижимной лентой для горных предприятий	05.05.06	к.т.н.

