

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра разработки месторождений полезных ископаемых
подземным способом

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Геомеханика» для студентов специальности
130400.65 «Горное дело» специализаций 130401.65 «Подземная
разработка пластовых месторождений», 130404.65 «Маркшейдерское
дело» и 130412.65 «Технологическая безопасность и
горноспасательное дело» всех форм обучения

Составители А. А. Ренев
Л. А. Белина



Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 05 от 17.12.2013

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
специальности 130400
Протокол № 16. от .10.06. 2014

Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

1. Введение

При исследовании различного рода механических процессов, отличающихся большой сложностью, возникают трудности как для чисто аналитических расчетов, так и для непосредственного наблюдения всех составляющих элементов процесса, протекающего в натуральных условиях. В этих случаях весьма ценными оказываются методы моделирования изучаемых процессов. Учитывая недостаточную разработанность теории давления горных пород, окружающих выработки, и сложность механических процессов, происходящих в толще пород при проведении выработок, следует считать целесообразным использование методов моделирования при изучении вопросов горного давления.

Первые опыты по исследованию на моделях явлений деформации и разрушений толщи пород, окружающих подземные выработки, производились уже в конце 19 века (М. Файоль, А. Леон, Ф. Вильгельм и др.). В отечественной горной науке первыми в области моделирования были М. М. Протодьяконов, Ф. А. Белаенко и Г. Л. Павленко. Их опыты давали некоторую аналогию с действительными процессами, происходящими в толще пород, однако не были соблюдены требования механического подобия и поэтому их результаты отражали лишь некоторые качественные стороны процессов. Кроме того эти исследования решали задачи только при неизменном контуре выработки, т. е. без учета динамики процесса.

Весьма ценным методом моделирования, позволяющим получать важные относительные количественные характеристики неоднородных напряженных состояний элементов сложных механических систем, является оптический метод исследования напряжений. Начало его применению для исследования характера напряженного состояния вокруг подземных выработок было положено Ф. Ю. Левинсоном-Лессингом. В дальнейшем применение оптического метода в указанном направлении было развито в

работах Л. З. Прокофьевой-Михайловской в ЛГУ. В дальнейшем этот метод для исследования вопросов горного давления получил значительное развитие в работах Института горного дела им. А. А. Скочинского, ВНИМИ и др.

Эти эксперименты позволили получить полезные сведения о характере распределения и концентрации напряжений в местах, непосредственно прилегающих к контуру очистного забоя, и главным образом, в зоне опорного давления.

В работах ВНИМИ получили развитие опыты по изучению оптическим методом характера распределения напряжений в объемных моделях, а также по изучению влияния динамических нагрузок, создаваемых взрывом. Однако результаты этих исследований не исчерпывают вопроса о характере поведения пород вокруг выработок, так как в опытах с моделями из оптически активных материалов нельзя воспроизвести всего обширного комплекса процессов деформации и разрушений пород, окружающих выработки, и в особенности процессов, связанных с перемещением забоя очистных выработок. Таким образом, необходимо иметь еще другой метод моделирования, который мог бы с наибольшей подробностью и близостью к натурным условиям воспроизвести процессы необратимых деформаций и разрушений пород, происходящих в различных выработках, особенно в случае подвигающегося очистного забоя.

Более удобен для исследования интересующих нас вопросов проявлений горного давления в связи с продвижением очистной выработки, предложенный Г. Н. Кузнецовым в 1936 г. Метод моделирования с помощью эквивалентных материалов, который также позволяет выполнить условия механического подобия.

Идея моделирования методом эквивалентных материалов заключается в следующем.

1. Модель толщи пород и вырабатываемого полезного ископаемого изготавливается из некоторых искусственно подобранных материалов с соблюдением геометрического подобия модели и натуры.

2. В целях достижения механического подобия материалы, из которых должна изготавливаться модель, подбираются не с произвольными физико-механическими свойствами, а с такими, которые находились бы в определенных соотношениях с физико-

механическими константами горных пород.

3. Эти соотношения определяются на основании общего Закона динамического подобия с учетом одновременного действия сил тяжести и внутренних напряжений.

4. Материал, удовлетворяющий по своей механической прочности указанным требованиям, при заданных свойствах моделируемой горной породы и заданном линейном масштабе модели получает название эквивалентного данной породе материала.

5. Моделирование крепления и закладки осуществляется путем введения в модель специальных приборов, работа которых должна удовлетворять требованиям механического подобия натуре.

6. При соблюдении указанных выше условий, а также необходимых начальных и контурных условий механические процессы, происходящие в модели в связи с проведением в ней выработок, геометрически подобных натуре, должны развиваться в форме, близкой к натуре. При этом, так же как и в натуре, развитие указанных процессов будет происходить под действием сил тяжести самой модели без применения каких-либо внешних нагрузок.

Практическая разработка метода моделирования эквивалентными материалами была начата в 1937 г. во ВНИМИ.

В 1941 г. была разработана рецептура некоторых типов материалов, пригодных для изготовления моделей масштаба 1:100. Уже первые опыты показали близкое сходство в элементах процесса деформации и смещений толщи массива в модели и в натуре. С 1951 г. метод моделирования эквивалентными материалами широко применяется в КузНИУИ, ПНИУИ, ЛГИ и др.

В практике работ лабораторий моделирования изучались следующие основные вопросы.

1. Характер механизма деформаций, разрушений и смещений толщи пород, окружающих очистные выработки.

2. Характер взаимодействия боковых пород с крепью очистной выработки в зависимости от состава боковых пород, типа крепи и способов разработки полезного ископаемого.

3. Характер распределения и величина опорного давления, возникающего вокруг очистных выработок при различных условиях залегания разрабатываемых пластов и при различном вза-

имном расположении выработок.

4. Механизм разрушения и потери устойчивости кровли камер и междукамерных целиков при различных их размерах камер и целиков и при различном строении и трещиноватости пород кровли и целиков.

5. Характер деформирования и разрушения пород, окружающих капитальные и подготовительные выработки.

6. Характер распределения давления на крепь вертикальных шахтных стволов в зависимости от состава боковых пород и от податливости крепи.

7. Прочность неоднородных и трещиноватых пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния.

8. Влияние динамических нагрузок, создаваемых взрывом, на устойчивость подземных горных выработок.

Кроме того разрабатывались различные методические вопросы, направленные на совершенствование моделирования с помощью эквивалентных материалов.

Все эти исследования на моделях оказали большую помощь в правильной интерпретации данных, полученных при шахтных наблюдениях, в построении научно обоснованных гипотез механизма процессов проявлений горного давления, а также в выборе соответствующих расчетных схем, необходимых для количественной оценки устойчивости пород в выработках и для определения рациональных параметров и характеристик крепи.

2. Теоретические основы моделирования методом эквивалентных материалов

Теоретической основой для моделирования каких-либо физических явлений служит учение о подобии. Определение свойств подобных явлений, которое называется также первой теоремой подобия, следующим образом сформулировано акад. М. В. Кирпичевым: «Подобными называются явления, происходящие в геометрически подобных системах, если у них во всех сходственных точках отношения одноименных величин есть постоянные числа. Эти отношения, так называемые константы подобия (или переходные множители), не могут быть выбираемы произвольно, так как величины, характеризующие явление, во-

обще говоря, не независимы друг от друга, а находятся в определенной связи, обусловленной законами природы. Во многих случаях эта связь может быть выражена математически в виде уравнения. Для подобных между собой явлений оно должно иметь одинаковый вид. Наличие такого «уравнения связи» между физическими величинами, характеризующими явление, налагает определенное ограничение на выбор констант подобия».

На основании общего определения свойств подобных физических явлений можно охарактеризовать механически подобные системы как такие системы, у которых все параметры, характеризующие механические процессы, происходящие в одной системе, могут быть получены простым умножением соответственных параметров другой системы на постоянные переходные множители. При этом для параметров различной физической природы множители различны, но для однотипных параметров этот множитель (константа подобия) имеет одно неизменное значение.

Когда мы характеризуем какой-либо механический процесс, мы совершенно свободны в выборе величин для любых трех основных единиц измерения, например длины, времени и массы.

После этого численные величины единиц измерения для всех прочих элементов, характеризующих рассматриваемый процесс (например, скорости, ускорения, внутренние напряжения в элементах системы), приобретают вполне определенные значения. В соответствии с этим механическое подобие определяется заданием переходных множителей (масштабов) для длины (геометрическое подобие), времени (кинематическое подобие) и массы (динамическое подобие).

Геометрическое подобие имеет место, если все размеры пространства, занятого изучаемой системой, и размеры ее отдельных элементов будут изменены в определенное число раз по сравнению с размерами пространства, занятого моделирующей системой.

Кинематическое подобие имеет место в этих двух системах в том случае, если сходственные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем.

Динамическое подобие имеет место в том случае, если Мас-

сы двух любых сходственных частиц, т.е. частиц, соответственным образом расположенных в пространстве и времени, отличаются друг от друга постоянным множителем.

Можно привести следующий вывод математической формулировки закона динамического подобия Ньютона.

Будем обозначать прописными буквами латинского алфавита элементы, характеризующие исходную натуральную систему, а строчными латинскими буквами – соответствующие элементы системы, сопоставляемой с исходной, т.е. элементы модели. В тех же случаях, когда неудобно будет применять указанное разделение на прописные и строчные буквы латинского алфавита, будем обозначать элементы исходной системы подстрочным значком «н», а элементы модели подстрочным значком «т». Переходные множители будем обозначать буквой « α » с подстрочным значком, отвечающим тем элементам, которые характеризуются данным множителем.

Признаки геометрического подобия запишутся в виде отношения линейных размеров:

$$\frac{L}{l} = \alpha_l, \quad (1)$$

где L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; α_l – переходный множитель по линейным размерам; а кинематического подобия – в виде отношения времени:

$$\frac{T}{t} = \alpha_t, \quad (2)$$

где T – время в исходной системе, с; t – время в модели, с; α_t – переходный множитель по времени.

Динамическое подобие должно быть определено отношением масс любых двух сходственных частиц:

$$\frac{M}{m} = \alpha_m, \quad (3)$$

где M – масса в исходной системе, кг; m – масса в модели, кг; α_m – переходный множитель по массе.

Однако, имея в виду, что массу можно выразить как произведение объема частицы на ее плотность, мы можем переписать последнее равенство следующим образом:

$$\alpha_m = \frac{M}{m} = \frac{\rho_n L^3}{\rho_m} \cdot \alpha_l^3, \quad (4)$$

где M – значение массы в исходной системе, кг; m – значение массы в модели, кг; ρ_n – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; L – линейный размер в исходной системе, м; α_l – переходный множитель по линейным размерам.

Так как уже задано условие геометрического подобия, то усилие динамического подобия достаточно задать отношением плотностей:

$$\frac{\rho_n}{\rho_m} = \alpha_\rho, \quad (5)$$

где ρ_n – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; α_ρ – переходный множитель по плотностям.

Имея значения трех основных множителей (1), (2) и (5), можно установить выражение для отношения любых элементов.

Учитывая, что сила равняется массе, умноженной на ускорение, напишем отношение сил, действующих на сходственные частицы:

$$\alpha_p = \frac{P_n}{P_m} = \frac{MA}{ma}, \quad (6)$$

где α_p – переходный множитель по силе; P_n – сила в исходной системе, Н; P_m – сила в модели, Н; M – значение массы в исходной системе, кг; m – значение массы в модели, кг; A – ускорение в исходной системе, м/с²; a – ускорение в модели, м/с².

Отношение ускорений:

$$\frac{A}{a} = \frac{L}{T^2} \cdot \frac{l}{t^2}; \quad \frac{A}{a} = \frac{Lt^2}{lT^2}; \quad \alpha_a = \frac{\alpha_l}{\alpha_t^2}, \quad (7)$$

где A – ускорение в исходной системе, м/с²; a – ускорение в модели, м/с²; L – линейный размер в исходной системе, м; T – зна-

чение времени в исходной системе, с; l – линейный размер модели, м; t – значение времени в модели, с; α_l – переходной множитель по линейным размерам; α_t – переходной множитель по времени, α_a – переходной множитель по ускорению.

Выразив в уравнении (1.6) массы частиц через плотности и объем, получим

$$a_p = \frac{\rho_H L^3 L}{T^2} : \frac{\rho_m l^3 l}{t^2}, \text{ откуда } a_p = \frac{\rho_H L^4 t^2}{\rho_m l^4 T^2}, \quad (8)$$

где α_p – переходной множитель по силе; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; T – значение времени в исходной системе, с; t – значение времени в модели, с; ρ_m – плотность в модели; ρ_H – плотность в исходной системе, кг/м³.

Откуда:

$$\alpha_p = \alpha_p \alpha_l^4 \alpha_t^{-2}, \quad (9)$$

где α_p – переходной множитель по силе; α_p – переходной множитель по плотности; α_l – переходной множитель по линейным размерам; α_t – переходной множитель по времени.

Заметив, что отношение скоростей сходственных точек в двух системах будет выражаться уравнением

$$\frac{V}{v} = \frac{L}{T} : \frac{l}{t} = \alpha_v; \quad \alpha_v = \frac{Lt}{Tl}; \quad \alpha_v = \frac{\alpha_l}{\alpha_t}, \quad (10)$$

где V – скорость в исходной системе, м/с; v – скорость в модели, м/с; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; T – значение времени в исходной системе, с; t – значение времени в модели, с; α_v – переходной множитель по скорости; α_l – переходной множитель по линейным размерам; α_t – переходной множитель по времени.

Заменяя переходные множители соответствующими отношениями, получим (11)

$$\alpha_p = \frac{P_n}{P_m} = \frac{\rho_n L^2 V^2}{\rho_m l^2 v^2}, \quad (11)$$

где α_p – переходной множитель по силе; P_n – сила в исходной системе, Н; P_m – сила в модели, Н; ρ_n – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; V – скорость в исходной системе, м/с; v – скорость в модели, м/с.

Или:

$$\frac{P_1}{\rho_1 L^2 V^2} = \frac{P_m}{\rho_m l^2 v^2} = N_e. \quad (12)$$

где P_n – сила в исходной системе, Н; P_m – сила в модели, Н; ρ_n – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; V – скорость в исходной системе, м/с; v – скорость в модели, м/с; N_e – число Ньютона

Зависимость (12), выражающая первую теорему подобия, означает, что элементы движения для сходственных точек в двух системах связаны определенным соотношением, которое имеет одинаковое значение в подобных системах.

Как видно из выражения (12), эти соотношения являются безразмерными величинами. Безразмерные числа, тождественность значений которых характеризует системы, подобные между собой, называются критериями или инвариантами подобия.

Соотношение (12), выражающее основной критерий динамического подобия, называется критерием подобия или числом Ньютона N_e .

Условия однозначности – это такие условия, которые выделяют из всей совокупности однотипных явлений одно конкретное явление.

Подобие условий однозначности определяется следующими признаками:

1) подобием геометрических свойств системы, в которой происходит изучаемый процесс;

2) пропорциональностью физических констант, имеющих существенное значение в изучаемом вопросе;

- 3) начальным состоянием системы;
- 4) подобием условий на границах системы в течение периода исследования процесса.

Обязательным условием подобия является также равенство определяющих критериев. Определяющими критериями подобия являются лишь такие, которые составлены из величин, входящих в условие однозначности, т.е. из тех геометрических свойств и тех физических констант, которые имеют существенное значение в изучаемом процессе.

Изложенные выше общие выводы теории подобия Необходимо приложить к интересующим нас случаям моделирования механических процессов, происходящих в толще пород под влиянием горных выработок.

Как указывалось выше, критерии и константы подобия могут быть выведены из уравнений связи. Для этого надо знать уравнение, выражающее связь между собой тех величин, которые характеризуют рассматриваемое явление.

Удовлетворительное решение поставленной задачи может быть достигнуто при условии правильного и полного учета основных физических факторов, действующих в исследуемом процессе. Таким образом, применение этого способа требует предварительного накопления опытных данных, а также известной интуиции исследователя, позволяющих установить комплекс тех. главных факторов, которые определяют ход исследуемого процесса.

Окончательная проверка правильности установленных критериев подобия и переходных множителей для параметров изучаемой механической системы может быть сделана после проведения опытов на модели и сравнения полученных результатов с соответствующими данными, известными для натуральных условий.

Большой опыт применения методов моделирования показывает, что даже приближенное удовлетворение требованиям теории подобия в модели позволяет получить весьма ценные данные, освещающие качественную сторону изучаемых явлений и вскрывающие элементы механизма исследуемых процессов. Эти данные, как правило, могут быть непосредственно использованы при решении различных вопросов практики в натуральных условиях.

В первом приближении мы можем ограничиться учетом двух родов сил, а именно: внешних сил – тяжести и внутренних

сил – напряжений, возникающих в породе. Если принять, что эти два рода сил, наряду с подобием геометрических свойств системы, начальным ее состоянием и подобием граничных условий, однозначно определяют поведение нашей системы, то можно вывести на основании общего закона подобия Ньютона и метода размерностей определяющий критерий подобия, соответствующий совместному действию указанных двух родов сил.

Преобразуем формулу, выражающую общий закон механического подобия Ньютона, для случая совместного действия сил тяжести и внутренних напряжений, возникающих в массе пород, окружающей выработку. Заменяя отношение квадратов скоростей V^2 и v^2 соответственно через отношения ускорений и длин $V^2: v^2 = AL : al$, получим

$$\frac{P_m}{\rho_m al^3} = \frac{P_H}{\rho_H AL^3}, \quad (13)$$

где P_H – сила в исходной системе, Н; P_m – сила в модели, Н; ρ_H – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; A – значение ускорения в исходной системе, м/с²; a – значение ускорения в модели, м/с².

В интересующих нас случаях деформации и разрушения породы происходят в результате действия сил тяжести. Поэтому величины a и A в формуле (13) будут равны ускорению силы тяжести, и, следовательно, мы можем заменить

$$\rho_m a = \rho_m q = \gamma_m; \quad \rho_H A = \rho_H q = \gamma_H, \quad (14)$$

где ρ_H – плотность в исходной системе, кг/м³; ρ_m – плотность в модели, кг/м³; A – значение ускорения в исходной системе, м/с²; a – значение ускорения в модели, м/с²; q – ускорение силы тяжести, м/с²; γ_m – объемный вес материала модели, г/см³; γ_H – объемный вес породы в натуре, г/см³.

Вводя, кроме этого, обозначения

$$\frac{P_m}{l^2} = N_m; \quad \frac{P_H}{L^2} = N_H, \quad (15)$$

где N_m – число Ньютона в модели, Н/м²; N_H – число Ньютона в

исходной системе, Н/м²; P_H – сила в исходной системе, Н; P_m – сила в модели, Н; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м.

И, подставляя их в формулу (15), получим

$$\frac{N_m}{\gamma_m l} = \frac{N_H}{\gamma_H l} = K = \text{const} \quad (16)$$

где N_m – число Ньютона в модели, Н/м²; N_H – число Ньютона в исходной системе, Н/м²; l – линейный размер в модели, м; γ_m – объемный вес материала модели, г/см³; γ_H – объемный вес породы в натуре, г/см³; K – некоторое безразмерное число, «определяющий критерий подобия» интересующих нас процессов деформации и разрушений пород в условиях действия сил тяжести и напряжений, возникающих в породах.

Для того чтобы все механические процессы, вызываемые внутренними напряжениями под действием сил тяжести, были подобны во всех элементах двух сравниваемых систем, необходимо, чтобы во всех сходственных точках этих систем значение K , вычисленное по данным натурной системы, было равно значению K , вычисленному по данным системы, являющейся моделью.

Подбор механических характеристик эквивалентного материала, обеспечивающего подобие механических процессов в модели, должен производиться по формуле

$$N_m = \frac{l}{L} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_H} N_H, \quad (17)$$

где N_m – число Ньютона в модели, Н/м²; N_H – число Ньютона в исходной системе, Н/м²; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м; γ_m – объемный вес материала модели, г/см³; γ_H – объемный вес породы в натуре, г/см³.

Имея данные о характеристиках механических свойств моделируемых пород, выражающихся в некоторых численных значениях, мы можем для заданного масштаба модели l/L и заданного отношения γ_m/γ_H подсчитать численные значения соответствующих характеристик механических свойств материала модели, которые необходимы для обеспечения подобия модели и природы.

Рассмотрение совместной деформации массива, составлен-

ного из нескольких слоев различных материалов, под действием собственного веса этих слоев показывает, что механическое подобие системы не будет нарушено в том случае, если наряду с удовлетворением условий, выраженных формулой (17), для всех соответственных слоев справедливо равенство

$$\frac{\gamma_{m_1}}{\gamma_{H_1}} = \frac{\gamma_{m_2}}{\gamma_{H_2}} = \dots = \frac{\gamma_{m_n}}{\gamma_{H_n}}, \quad (18)$$

где γ_{m_1} – объемный вес материала первого слоя модели, г/см³; γ_{m_2} – объемный вес материала второго слоя модели, г/см³; γ_{m_n} – объемный вес материала «n» слоя модели, г/см³; γ_{H_1} – объемный вес первого слоя породы в натуре, г/см³; γ_{H_2} – объемный вес второго слоя породы в натуре, г/см³; γ_{H_n} – объемный вес «n» слоя породы в натуре, г/см³.

При экспериментировании с моделями появляется необходимость измерять давление, передающееся на крепь выработки со стороны окружающих «пород». Поэтому необходимо рассчитать переходный множитель для сил реакции крепи к натуре P_H и соответствующих сил P_m в модели. Его можно определить, исходя из условия, что отношение реакций крепи в модели и в натуре должно быть равно отношению сил тяжести соответственных объемов материала модели и природы, т.е.

$$\frac{P_m}{P_H} = \frac{\gamma_m}{\gamma_H} \cdot \frac{l^3}{L^3}, \quad (19)$$

где P_H – сила реакции в исходной системе, Н; P_m – сила реакции в модели, Н; γ_m – объемный вес материала модели, г/см³; γ_H – объемный вес породы в натуре г/см³; L – линейный размер в исходной системе, м; l – линейный размер в модели, м.

Откуда

$$P_m = \left(\frac{l}{L}\right)^3 \frac{\gamma_m}{\gamma_H} P_H. \quad (20)$$

где P_m – сила реакции в модели, Н; L_H – размер в исходной системе м; l_m – размер в модели, м; γ_m – объемный вес материала мо-

дели, г/см^3 ; γ_n – объемный вес породы в натуре г/см^3 ; P_n – сила в исходной системе, Н.

3. Материалы, применяемые для изготовления моделей

При подборе материалов – эквивалентов исходными инертными материалами могут служить кварцевый или речной песок, молотая слюда (мика), тальк, мел, глина и др. Кроме того, в некоторых случаях применяются дробь, чугунная стружка, резиновая крошка, древесные опилки. В качестве цементирующих веществ в основном используются гипс, цемент, клей силикатный, парафин, канифоль, вазелин.

Кварцевые или речные пески должны быть чистыми, не загрязненными глинистыми включениями, однородными. Пески относятся к группе гидрофильных материалов.

Молотая слюда может применяться различных сортов, в зависимости от целевого назначения. Так, например, для изготовления смесей можно пользоваться мелкими фракциями слюды, в качестве прослоечного материала – более крупными фракциями. Слюда относится к гидрофильным материалам, хорошо смачивается водой. Пользуются преимущественно мелкими фракциями молотой слюды $d = (0,30 - 0,50)$ мм, а в качестве прослоечного материала – фракциями с $d = (1,0-5,0)$ мм.

Мел и тальк могут употребляться в качестве добавок к основным инертным материалам.

В случае необходимости получения тяжелых эквивалентных материалов с повышением объемных весов (до $3,0 \text{ г/см}^3$) могут применяться добавки в основные материалы в виде чугунной или свинцовой дроби с крупностью дробины 2–3 мм.

В качестве цементирующего или вяжущего материала может употребляться водный раствор формовочного или штукатурного гипса (алебастра). Формовочный гипс отличается более тонким помолом и более короткими сроками схватывания.

Парафин может употребляться технический. Обладая низкой точкой плавления ($42-54$)°С, большой однородностью, способностью хорошо проникать и обволакивать мелко стираемый материал инертных наполнителей, парафин может явиться удобным цементирующим материалом. Парафин относится к гидрофобной группе материалов.

Канифоль можно применять как самостоятельное вяжущее и как сплав с парафином для получения очень прочных и хрупких смесей. Канифоль в смеси с парафином применяется в пропорции 1:2, 1:1 или 1:0,5.

Смеси, цементированные парафином, имеют следующие положительные качества:

- 1) однородность изготавливаемых слоев в модели по всей их длине;
- 2) удобство укатки слоев в модели благодаря высоким пластическим свойствам смеси в горячем состоянии;
- 3) готовность модели к испытанию сразу же после ее остывания, т.е. через 2–3 часа после укатки последнего слоя;
- 4) возможность повторного использования материала после отработки модели.

Для смеси с парафином применяют стандартную Температуру нагрева $(130 \pm 3)^\circ\text{C}$. Если применяется смесь, цементированная сплавом канифоли и парафина, то кварцевый песок разогревается в смесителе до $(175\text{--}180)^\circ\text{C}$. Одновременно в отдельном сосуде расплавляется требуемое количество канифоли с парафином, заливается в горячий песок и перемешивается в течение 10 мин, после чего смесь укладывается в модель.

Готовая смесь в горячем состоянии укладывается в опалубку модельного стенда. С помощью гладилки слои разглаживаются, а затем укатываются катком через картонный лист толщиной 1,5 мм. Укатка производится за 10 полных циклов (прямой и обратный ход катка). Толщина слоя рекомендуется 1-2 см.

4. Приборы, применяемые для оформления моделей из эквивалентных материалов

Для получения эквивалентного материала, цементированного парафином и канифолью, необходимы специальные смесители с электрообогревом (см. рис.). К специальному оборудованию относятся гладилки и укатки. Гладилки служат для разравнивания поверхности слоя смеси. Катки представляют собой стальные цилиндры наружным диаметром 78 мм и длиной, равной ширине плоской модели. Между катком и закатываемым слоем модели помещается изолирующая полоска картона толщиной 1,5 мм для

предотвращения накапливания смеси к катку.

Технология изготовления материалов, цементированных парафином, сводится к следующему. Смесь нагревается до оптимальной температуры $(130 \pm 3)^\circ\text{C}$, обеспечивающей более однородный состав получаемого материала. В случае изготовления небольших проб материалов нагрев и тщательное перемешивание шихты инертных наполнителей могут производиться в термостабах. Нагрев смеси в больших количествах производится в специальных смесителях с электрообогревом (см. рис.). Заранее отвешенная порция парафина в размельченном виде засыпается в горячую смесь и перемешивается в смесителе в течение (25–30) мин при той же температуре $(130 \pm 3)^\circ\text{C}$.

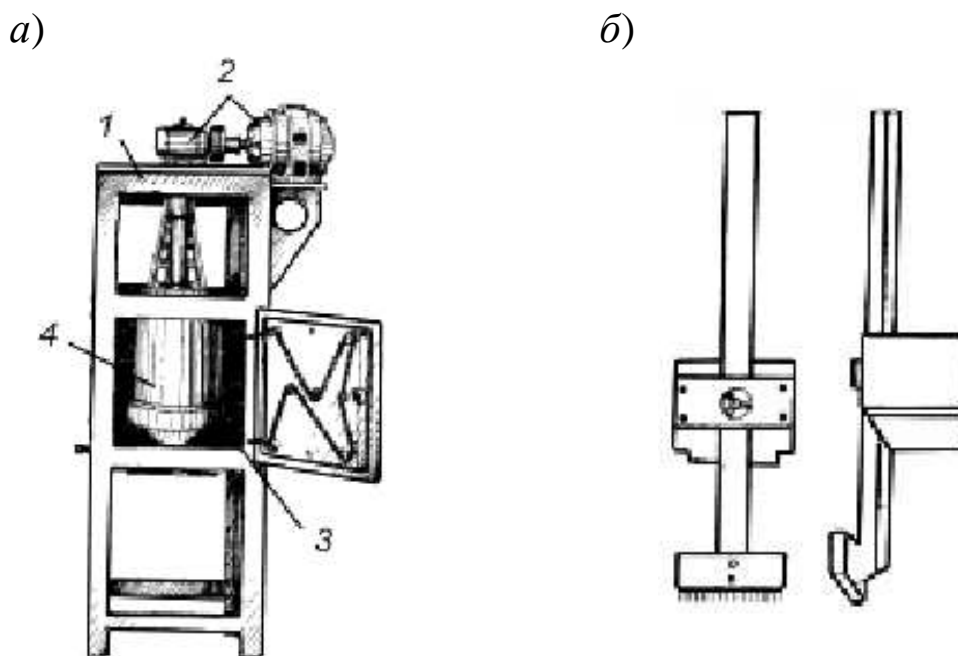


Рис. Оборудование для изготовления модели:

а – смеситель с электронагревом; б – грабли для разравнивания смеси; 1 – каркас смесителя; 2 – двигатель с редуктором; 3 – нагревательный шкаф; 4 – смесительная камера

5. Технология изготовления моделей

Для изготовления модели должны быть заданы: геологический разрез исследуемого участка и, в соответствии с задачами исследования, масштаб моделирования. Выбор же рецептуры материалов-эквивалентов будет зависеть от физико-механических

свойств моделируемых пород и масштаба модели.

Рассмотрим пример подбора материала, эквивалентного горной породе, имеющей следующие показатели прочности и объемного веса: $\sigma_m = 600 \text{ кг/см}^2$; $\sigma_n = 82 \text{ кг/см}^2$; $\gamma_n = 2,3 \text{ г/см}^3$.

Допустим, что по содержанию поставленной задачи и заданному масштабу моделирования 1:100 в качестве материала модели берется смесь, цементированная парафином, и принимается для расчета типовое отношение объемных весов γ_m/γ_n . Тогда прочностные характеристики требуемого материала, эквивалентного данной горной породе, определяются из следующих расчетов:

$$\sigma_m = (R_c)_m \frac{l}{L} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} = \frac{1}{100} 0,6 \cdot 600 = 3,6 \text{ кг/см}^2, \quad (21)$$

$$\sigma_n = (R_n)_m \frac{l}{L} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} = \frac{1}{100} 0,6 \cdot 82 = 0,49 \text{ кг/см}^2, \quad (22)$$

$$\gamma_m = 0,6 \gamma_n \cdot 23 = 1,38 \text{ г/см}^3, \quad (23)$$

где σ_m – показатель прочности модели; кг/см^2 ; σ_n – показатель прочности исходного материала, кг/см^2 ; R_c – масштаб моделирования в исходной системе; R_n – масштаб моделирования в натуре; l – линейный размер в модели, м; L – линейный размер в исходной системе, м; γ_m – объемный вес материала, г/см^3 ; γ_n – объемный вес породы в натуре, г/см^3 .

Расчет веса одного слоя в модели производится следующим образом. Задаваясь мощностью слоя, а также длиной и шириной модели, определяем искомый вес слоя модели по формуле

$$P = l \cdot b \cdot m \cdot \gamma_m K, \quad (24)$$

где l – длина модели, 100 см; b – ширина модели, 10 см; m – мощность слоя, (1 см); γ_m – объемный вес материала, $1,38 \text{ г/см}^3$; K – коэффициент запаса на потери материала при изготовлении, который обычно берется равным от 1,10 до 1,15. Для расчета принимаем $K = 1,10$.

Тогда $P = 100 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 1,38 \cdot 1,10 = 1518 \text{ г}$.

Исходя из найденного по рабочим графикам процента содержания отдельных компонентов в смеси по весу и общего слоя,

производим расчет навесок отдельных компонентов для изготовления одного слоя.

Желательно перед изготовлением модели провести контрольные пробные опыты по подобранной рецептуре с определением механических характеристик получаемых материалов. Если характеристики физико-механических свойств этих материалов будут значительно отличаться от заданных, следует несколько изменить состав рецепта, руководствуясь направлением градиента изменения соответствующих характеристик по данным рабочих графиков. Перед изготовлением модели должны быть заранее произведены все подготовительные операции, например, предварительная сборка опалубки модельного стенда и ее подгонка, подготовка шкал и ограждений прозрачных стенок, подготовка мелкого оборудования, отмеривание и развешивание материалов, проверка смесительных устройств, установление режима технологического процесса и составление примерного графика изготовления модели.

Для того чтобы гарантировать отсутствие склеивания двух смежных слоев при их изготовлении, необходимо выдерживать интервалы времени между закаткой слоев не менее 15 мин. Для создания монолитности слои закатываются подряд следующим образом: после укатки первого сантиметрового слоя поверхность его вновь разграбливается, чтобы создать несколько шероховатую поверхность для лучшей связи с последующим слоем, и сразу же закатывается новый слой смеси, образующий общий монолитный слой с предыдущим, и т.д.

Устанавливается заранее также режим операций по воспроизведению кливажа в модели.

Расчет навесок, фиксация укатки каждого слоя (время и мощность), количество прослоечного материала и другие данные заносятся в регистрационный журнал. Там же, в журнале, должен быть эскизно изображен схематический разрез модели: количество слоев, их мощность, разделение на группы по рецептам.

При изготовлении моделей из парафинированных смесей нагрев и перемешивание шихты инертных наполнителей производятся в камере смесителя с электронагревом; при $t \approx 130^\circ\text{C}$ в течение 30-45 мин. После этого добавляется требуемое количест-

во размельченного парафина и прогрев с перемешиванием продолжается еще (25–30) мин.

Рабочая загрузка смесью не должна превышать (60–70)% общей емкости смесителя.

Процесс изготовления отдельных порций смеси может быть ускорен путем предварительного подогрева перемешанной шихты в термостате, в результате чего в камере смесителя шихта находится только (25–30) мин для смешивания ее с парафином.

Готовая смесь в горячем состоянии выгружается из смесителя и перекладывается в модельный стенд. Масса насыпается по возможности ровным слоем и разрыхляется граблями, укрепленными на ползуне, который скользит по направляющим вдоль опалубки. Излишек массы удаляется гладилкой, укрепляемой на таком же ползуне. После разравнивания смеси слой укатывается катком через картон. Давление катка 235 г на 1 см ширины закатываемого слоя. Для уплотнения слоя мощностью 1 см достаточно 10 полных циклов укатки.

С помощью металлической линейки с миллиметровыми делениями, укрепленной на деревянной рейке гладилки, фиксируется мощность каждого закатываемого слоя модели, которая регистрируется в журнале. Слои в модели закатываются при горизонтальном их положении. Разделение толщи пород в модели на отдельные слои достигается присыпкой поверхности каждого слоя молотой слюдой крупных фракций (0,5–5) мм.

Количество прослоечного материала (слюды) и его крупность создают различные условия трения на контакте между слоями. Разделяя слюду на фракции и регулируя ее количество на 1 см² поверхности модели, можно получать различные величины коэффициента трения между двумя соседними слоями. По мере повышения уровня закатываемых слоев наращивается опалубка.

Воспроизведение трещиноватости (кливажа) в слоях модели осуществляется насечками ножом только что изготовленного слоя, который не успел схватиться (в смесях, цементированных гипсовым раствором) или остыть (в смесях, цементированных парафином). Заданная пространственная ориентировка поверхности кливажа осуществляется соответствующим наклоном ножа во

время нагрузки слоя. Для удобства нарезки слоя эквивалентного материала и соответствия заданному наклону можно пользоваться легким деревянным шаблоном (со скошенными под заданным углом нарезки краем), который ставится непосредственно на смесь. Степень ослабления материала по поверхности кливажа может регулироваться применением различных режимов нарезки. После нарезки для сглаживания поверхности слоя смесь укатывается легким деревянным катком три раза через ватманскую бумагу. Удельное давление катка на 1 см ширины слоя – 20 г. Следующий слой обычным металлическим катком для уплотнения слоя в целом и, если требуется воспроизвести кливаж, опять укатывается деревянным катком после нарезки, как описано выше.

Наиболее эффективным надо считать десятиминутный промежуток времени, который может быть рекомендован при нарезке материалов, цементированных парафином. Нарезка слоев, произведенная по истечении 10 мин после изготовления, уменьшает значение разрушающего напряжения при изгибе на (30–50)% по сравнению с монолитным слоем.

Стенды для изготовления моделей в зависимости от задач исследования могут быть различными. Конструкция модельных стендов для плоских моделей может представлять собой жесткую прямоугольную раму из углового железа с основанием из швеллеров № 14–24 (в зависимости от величины пролетов основания стенда) и с набором швеллеров № 8–10 в качестве наращиваемой с обеих сторон (во время изготовления плоской модели) опалубки.

Длина модельного стенда и его высота выбираются исходя из задач исследования и масштаба модели.

6. Моделирование крепей

Создание приборов, воспроизводящих работу крепей, является наиболее сложной частью моделирования. Это объясняется тем, что эти приборы должны обеспечить основные требования геометрического, кинематического и силового подобия. На достаточно высоком уровне это можно сделать только в условиях хорошо оснащенных специальных научно-исследовательских лабораторий моделирования, где есть специалисты по тензометрии,

опытные мастера-модельщики.

Конструктивные схемы элементов различных крепей в моделях разработаны во ВНИМИ в лаборатории проф. Г. Н. Кузнецова. Большой опыт в этой области накоплен в ПНИУИ, КузНИУИ, ИГД СО РАН. Сложные и точные приборы оправданы и необходимы при выполнении научных исследований для получения результатов, на основе которых делаются практические рекомендации. Для учебных целей вполне допустимо использовать упрощенную модель, имитирующую крепь поддерживающего или оградительно-поддерживающего типа с жесткими стойками.

Если необходимо изучить влияние постоянного сопротивления крепи на характер поведения кровли, можно имитировать крепь при помощи простейшего рычажного устройства.

Величина сопротивления крепи при этом регулируется изменением веса груза на рычаге.

7. Измерение смещений пород на модели

Измерение смещений пород во многих случаях является важнейшей целью исследований, поэтому они должны выполняться особенно тщательно. Наиболее точные результаты дает метод фотофиксации смещений. Этот метод очень сложен, требует очень точной и дорогостоящей аппаратуры, поэтому используется только для очень точных измерений. В большинстве случаев применяют более простой и доступный способ измерений с использованием индикаторов часового типа, шток которых капроновой нитью соединяется с реперами-иглами, помещенными в модели. Этот метод вполне пригоден для учебных целей.

8. Порядок выполнения лабораторной работы

Выполнение лабораторной работы включает в себя четыре этапа:

1. Изучение студентами материалов методических указаний с оформлением письменного отчета – 2 часа.

2. Знакомство студентов с приборами, аппаратурой, исходными материалами моделирования. Инструктаж по технике безо-

пасности работы в лаборатории (под роспись в специальном журнале) – 2 часа.

3. Подбор эквивалентных материалов и изготовление модели – 10 часов.

4. Испытания модели – 2 часа.

Время на выполнение третьего и четвертого этапов определяется преподавателем, исходя из фактического резерва времени, предусмотренного учебным планом.

Выполнение первых двух этапов можно производить группами без деления на подгруппы. Оптимальное количество студентов в подгруппе при работе на третьих и четвертых этапах составляет 6 человек (по 3 человека на два работающих смесителя).

Размеры плоской модели (длина 3 м, ширина 0,2 м) требуют для закатки одного слоя высотой 1 см при средней плотности смеси (1,3–1,4) г/см³ около 8 кг готовой смеси, что совпадает с рабочей производительностью смесителя. На оформление одного

слоя модели требуется примерно (40–45) минут, следовательно, за одно занятие при работе двух смесителей можно закатать 4 слоя по 1 см (что при масштабе моделирования 1:100 соответствует 4 м природы).

Горно-геологические условия моделируемой природы устанавливаются ведущим преподавателем. Например, для изучения качественной картины поведения пород при различной последовательности отработки свиты пластов можно рекомендовать следующую ситуацию:

1. Количество пластов в свите – 3.

2. Мощность пластов: верхнего – 2 м, среднего – 3,0 м, нижнего – 4,0 м.

3. Глубина залегания верхнего пласта от дневной поверхности 70 м (что составляет при масштабе моделирования 1:100 в модели 70 см).

4. Размер междупластья между верхним и средним пластами – 30 м (т.е. в модели 30 см), а между средним и нижним пластами – 40 м (т.е. в модели 40 см).

5. Непосредственная кровля всех пластов сложена аргиллитом ($\sigma_{сж} = 300$ кг/см²) мощностью 8 м (верхний пласт), 12 м (сред-

ний пласт) и 10 м (нижний пласт).

6. Непосредственная почва всех пластов представлена алевролитом ($\sigma_{сж} = 450 \text{ кг/см}^2$) мощностью 10 м (т.е. 10 см в модели).

7. Остальное междупластье сложено песчаником ($\sigma_{сж} = 900 \text{ кг/см}^2$).

Характеристика эквивалентных материалов для указанных выше пород, определенных сотрудниками кафедры РМПИ при выполнении предыдущих исследований, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики эквивалентных материалов

Состав смеси, % (по весу)			
Порода	песок	сляуда	парафин
Алевролит	95,5	3,0	1,5
Аргиллит	96,0	2,0	2,0
Песчаник	96,5	1,0	2,5
Уголь	96,5	2,5	1,0

Масштаб времени в модели устанавливается из выражения

$$t_m = t_n \sqrt{\alpha_1}, \quad (25)$$

где t_n – время протекания процесса в натуре; t_m – время протекания процесса в модели; α_1 – масштаб моделирования.

Исходя из этого, продолжительность суток на модели составит:

$$t_m = 24\sqrt{0,01} = 2,4 \text{ ч.}, \quad (26)$$

где t_m – время протекания процесса в модели.

Задачи, решаемые в конкретной лабораторной работе, формирует ведущий преподаватель. В первой лабораторной работе студенты изучают влияние величины сопротивления крепи на поведение пород кровли. Имитируются крепи поддерживающего типа с сопротивлением в натуре 500 кН/м^2 (50 т/м^2) и 1000 кН/м^2 (100 т/м^2) (крепь М–130 и УКП). Если имитировать в модели крепь поддерживающего типа с длиной перекрытия в натуре, равной 3 м, то при ширине плоской модели, равной 20 см, при-

держиваемое крепью призабойное пространство при масштабе моделирования 1:100 будет соответствовать 60 м² в натуре. Исходя из этого суммарное сопротивление крепи для распоров 50 и 100 т/м² в натуре составит 3000 и 6000 т. Тогда сопротивление крепи в модели можно определить по формуле

$$R_m = R_n \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \alpha_1^3, \quad (27)$$

где R_m – реакция крепи в модели, кг; R_n – реакции крепи в натуре, кг; γ_m – объемный вес материала, г/см³; γ_n – объемный вес породы в натуре, г/см³; α_1 – масштаб моделирования.

Сопротивление крепи в модели при сопротивлении в натуре 50 т/м²:

$$R_m = 3000 \times 1000 \frac{1,7}{2,5} \frac{1}{100^3} = 2,04 \text{ кг};$$

где R_m – реакция крепи в модели, кг.

Сопротивление крепи в модели при сопротивлении в натуре 100 т/м²:

$$R_m = 6000 \times 1000 \frac{1,7}{2,5} \frac{1}{100^3} = 4,08 \text{ кг}.$$

где R_m – реакция крепи в модели, кг.

Скорость подвигания лавы можно принять из расчета выполнения двух выемочных циклов по 0,6 м за смену, т.е. 1,2 м за 6 часов.

Длительность одной смены в модели устанавливается из выражения

$$t_m = t_n \sqrt{\alpha_1}$$

где t_m – время протекания процесса в модели; t_n – то же в натуре; α_1 – масштаб моделирования (1:100).

$$t_m = 6 \sqrt{\frac{1}{100}} = 0,6 \text{ часа} = 36 \text{ мин}.$$

Следовательно, через каждые 36 мин необходимо подвигать забой на 12 см, соответствующих 1,2 м природы.

На плоской модели можно также изучить влияние скорости подвигания очистных забоев и подработки вышележащих пластов нижележащими на поведение пород.

Учебная группа делится на подгруппы по 6 человек, из которых один является старшим. Старший группы:

1. Перед началом занятий получает рабочие халаты, инструменты и в конце занятий сдает лаборанту кафедры.

2. Распределяет студентов по 3 человека для работы на одном смесителе, обеспечивает порядок и чистоту на рабочем месте.

3. Контролирует заполнение «Журнала наблюдений».

Реперы и индикаторы часового типа устанавливаются после закатки модели. Схему расположения реперов выбирают с таким расчетом, чтобы можно было проследить за поведением всей исследуемой толщи пород. Первый ряд реперов устанавливается перед началом очистных работ в 10 см впереди разрезной печи, что соответствует 10 м натуре. Следующие ряды реперов устанавливаются через 30 см друг от друга, что соответствует 30 м натуре. Показания часовых индикаторов заносятся в журнал наблюдений по форме, приведенной в табл. 2.

По каждому реперу (по рядам) строятся графики опускания кровли.

Таблица 2

Экспериментальные данные по показаниям часовых индикаторов

Репер № 1			Репер № 2			И т.д.
Расст. до забоя, см	Расст. от забоя, см	Показания индикатора	Расст. до забоя, см	Расст. от забоя, см	Показания индикатора	

В журнале отмечаются все характерные моменты поведения кровли (шаг первичного обрушения непосредственной кровли, шаг первого обрушения основной кровли, размеры блоков основной кровли, характер трещинообразования и т.д.).

По завершению лабораторной работы проводится заключительное зачетное занятие.

Список рекомендуемой литературы

1. Баклашов, И. В. Геомеханика : учебник для студентов вузов : в 2 т. Т. 2 : Геомеханические процессы / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия, А. Н. Шашенко, В. Н. Борисов. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 249 с.

2. Михеев, О. В. Разработка и применение автоматизированных средств при планировании и сопровождении горных работ / О. В. Михеев, И. А. Шундулиди, В. Г. Казанцев, В. П. Магдыч; Моск. гос. горн. ун-т. – М. : Изд-во МГГУ, 2000. – 27 с.

3. Кузнецов, Г. Н. Моделирование проявлений горного давления / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Бudyко, Ю. И. Васильев [и др.]. – Л. : Недра, 1968. – 279 с.

4. Вылегжанин, В. Н. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов / В. Н. Вылегжанин, П. В. Егоров, В. И. Мурашев; отв. ред. Г. И. Грицко; АН СССР, Сиб. отд-ние. Ин-т угля. – Новосибирск : Наука, 1990. – 291 с.

Составители
Ренев Алексей Агафангелович
Белина Любовь Александровна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Геомеханика» для студентов специальности
130400.65 «Горное дело» специализаций 130401.65 «Подземная разработка
пластовых месторождений» 130404.65 «Маркшейдерское дело» и
130412.65 «Технологическая безопасность и горноспасательное дело»
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 30.06.2014. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Уч.-изд. л. 1,4 Тираж 79 экз. Заказ
КузГТУ650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А