

# БУДІВНИЦТВО ШАХТ ТА ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

УДК 622.257.1

© Должиков П.Н., Кипко А.Э., 2010

П.Н. Должиков, А.Э. Кипко

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТАМПОНИРОВАННЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД

P.N. Dolzhiikov, A.E. Kipko

## RESEARCH OF DEFORMATION BEHAVIOR OF THE GROUTED FISSURED ROCKS

Аналитически получено общее уравнение, учитывающее деформацию пород, скальных контактов и заполнителя трещин – для системной и хаотической трещиноватости. На основе экспериментальных исследований деформационных свойств глиноцементных растворов для затампонируемых пород установлены зависимости коэффициента Пуассона и модуля деформации от раскрытия трещин, показано их увеличение в 3–10 раз, что повышает устойчивость породного массива.

**Ключевые слова:** породы, трещины, раствор, тампонаж, модуль деформации.

Тампонаж трещиноватых горных пород глиноцементными растворами предназначен для гидроизоляции горных выработок от подземных вод [1], а также упрочнения пород [2]. Глиноцементный тампонажный раствор в трещинах не только надежно изолирует выработанное пространство, но и влияет на механические свойства массива. Этот эффект особенно важен при тампонаже зон тектонических нарушений; формировании изоляционных предохранительных завес; использовании глиноцементного раствора в качестве закладочного материала и т.д. [3]. Ранее деформируемость трещиноватых пород рассматривалась Руппнейтом [4]. Однако необходимо полное количественное представление об упрочнении трещиноватых горных пород глиноцементными растворами.

**Цель работы** – исследование деформационных свойств трещиноватого массива горных пород при заполнении трещин глиноцементными растворами.

Исходя из принципа суперпозиции получаем, что деформация трещиноватого массива равна сумме деформаций трещин и горной породы в блоках. Поэтому определим сначала модуль деформации трещины, заполненной раствором, с учетом скальных контактов. Для этого представим трещину в виде идеализированной системы, включающей одиночную трещину и два блока ненарушенной горной породы. Трещина заполнена раствором и имеет в своем сечении определенное число скальных контактов, которые учитываются с помощью их относительной площади  $\xi$ , что является отношением суммарной площади скальных контактов к площади стенки трещины в пределах блока.

Запишем общую силу, действующую на трещину:

$$F = F_p + F_k = (E_p + \xi E_1) S \cdot \varepsilon_\delta,$$

откуда следует, что модуль деформации трещины равен:

$$E\delta = E_p + \xi E_1,$$

где  $E_1$  – модуль деформации породных блоков;  $E_p$  – модуль деформации раствора в трещине;  $\varepsilon_\delta$  – относительная деформация трещины;  $S$  – площадь сечения блока.

Рассмотрим, как изменится модуль деформации системы „блок-трещина“ при заполнении трещины раствором. При сжатии породы с трещиной происходит деформация системы на величину  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \Delta h + \Delta\delta,$$

где  $\Delta h$  – абсолютная деформация блока;  $\Delta\delta$  – абсолютная деформация трещины.

Учитывая закон Гука, получаем:

$$\frac{l}{E_o} = \frac{h}{E_1} + \frac{\delta}{E_\delta},$$

где  $l$  – размер блока с трещиной;  $E_o$  – модуль деформации затампонируемой породы;  $h$  – размер блока без трещины.

Рассмотрим случай, когда  $\delta \leq h$ , тогда имеем ( $h \approx l$ ):

$$\frac{1}{E_o} = \frac{1}{E_1} + \frac{\delta}{hE_\delta} = \frac{1}{E_1} \left( 1 + \frac{E_1\delta}{hE_\delta} \right),$$

или:

$$E_o = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1 \delta}{h(E_p + \xi E_1)}} = \frac{E_1}{1 + \eta}, \quad (1)$$

Если  $E_p = 0$ , т.е. когда трещина пуста и учитываются лишь скальные контакты, мы получаем выражение для показателя  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\delta}{\xi h},$$

если скальные контакты отсутствуют, но трещина заполнена (т.е.  $\xi = 0$ ), получаем уравнение:

$$\eta = \frac{\delta E_1}{h E_p}.$$

Полученное уравнение (1) наиболее общее и учитывает как деформацию скальных контактов, так и заполнителя трещины.

Поэтому, при оценке деформируемости затампонированного массива, материал заполнителя трещин должен быть подвергнут компрессии при фактических на-

грузках для получения зависимости  $\Delta \delta_p$  от  $\sigma_p$ . В таком случае:

$$E_o = \frac{E_1}{1 + \eta}, \quad (2)$$

где  $\eta = \frac{E_1 \delta}{h(E_p + \xi E_1)}$ .

Следовательно, изменяется коэффициент Пуассона затампонированных горных пород и он будет равен:

$$\nu_o = \frac{\nu_1}{1 + \eta},$$

где  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона породных блоков.

Исследование компрессионных свойств глиноцементных растворов подробно изучено в работе [2]. Лабораторными методами проведено изучение относительной деформации глиноцементных растворов при действии фактических нагрузок до 1 МПа, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Деформационные свойства глиноцементных растворов

Нагрузка, $\sigma_p$ , МПа	Относительная деформация глиноцементного раствора, $\varepsilon_p \times 10^2$													
	Состав 1 ( $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ , Ц = 100 кг)			Состав 2 ( $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ , Ц = 150 кг)					Состав 3 ( $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ , Ц = 200 кг)			Состав 4 ( $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ , Ц = 400 кг)		
	время стабилизации, сут			время стабилизации, сут					время стабилизации, сут			время стабилизации, мес		
	1	3	15	1	3	15	30	60	1	3	15	1	2	
0,1	1,48	0,32	0	0	0,28	0	1,50	0,96	1,20	0,36	0	1,00	1,92	
0,2	1,68	0,72	0	0,76	2,24	0	5,70	1,92	2,52	1,44	0	2,50	2,80	
0,3	5,12	1,40	0,24	4,00	2,68	0,12	8,65	3,84	6,32	1,84	0,20	5,20	3,80	
0,4	8,00	2,70	0,72	8,00	3,28	0,36	11,50	6,15	7,80	2,08	0,44	9,60	4,80	
0,5	14,20	4,00	1,40	9,80	3,44	0,60	11,50	7,69	8,36	2,72	0,64	10,60	4,80	
0,6	16,50	5,40	2,40	11,08	4,00	0,96	11,50	7,69	9,92	3,80	0,96	13,50	4,80	
0,7	19,40	6,08	3,30	12,40	4,88	1,40	11,50	7,69	12,73	4,36	1,20	13,50	4,80	
0,8	20,00	7,56	4,60	12,52	5,96	1,96	11,50	7,69	12,96	5,00	1,60	13,50	4,80	
0,9	20,30	9,48	6,30	12,76	7,60	2,60	11,50	7,69	13,32	6,44	2,00	13,50	4,80	
1,0	20,90	9,96	7,20	12,84	8,20	3,60	11,50	7,69	13,60	6,68	2,70	13,50	4,80	

Зависимость (1) получена при условии, что  $\delta \ll h$ . Однако в раздробленных зонах тектонических нарушений это соотношение может и не выполняться. Поэтому были получены зависимости модуля деформации не вводя условие  $\delta \ll h$ :

$$E_o = \frac{E_1}{1 + \eta}; \quad \eta = \frac{\delta(E_1 - E_p)}{(h + \delta)(E_p + \xi E_1)}. \quad (3)$$

Зависимости (2) и (3) получены для ориентированной системы трещин. Теперь рассмотрим затам-

понированный горный массив с хаотической трещиноватостью.

Для модуля деформации массива с хаотической трещиноватостью, при известном факторе  $\eta$ , используем уравнение Руппенейта:

$$\frac{E_1}{E_\phi} \approx \frac{5}{8} \cdot \frac{1 + \eta}{1 + m},$$

где  $E_\phi$  – модуль деформации породы с хаотической трещиноватостью:

$$E_{\phi} = \frac{8}{5} \cdot E_1 \frac{1+m}{1+\eta}$$

С учетом полученных выше зависимостей (2) и (3) в общем случае:

$$E_{\phi} = \frac{8}{5} E_1 \frac{(1+m)(E_p + \xi E_1)}{E_p + E_1 m + \xi E_1}$$

Все рассмотренные выше случаи изменения модуля деформации затампонируемых трещиноватых пород не учитывали изменения деформации породы во времени без изменения нагрузки, т.е. ползучести. В работе [4] приводится уравнение для модуля деформации массива с учетом времени при  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$  и  $t \rightarrow \infty$ :

$$E_o = \frac{E_1}{1 + \alpha\eta + \frac{\beta\sigma}{\xi E_1}}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – безразмерные константы, характеризующие деформационную способность горной породы.

Следовательно, при заполнении трещин раствором величина модуля деформации будет изменяться в зависимости от изменения  $\xi$  и имеет общий вид:

– для систем трещин:

$$E_o = \frac{E_1}{1 + \frac{\alpha\delta(E_1 - E_p)}{(h + \delta)(E_p + \xi E_1)} + \frac{\beta\sigma}{\xi E_1 + E_p(1 - \xi)}} \quad (4)$$

– для хаотической трещиноватости:

$$E_{\phi} = \frac{8}{5} \frac{E_1}{1 + \alpha\eta + \frac{\beta\sigma}{\xi E_1 + E_p(1 - \xi)}} \quad (5)$$

При отсутствии в заполненной раствором трещине скальных контактов, членом при  $\beta$  в выражениях (4) и (5) следует пренебречь, если же трещина не заполнена раствором, то параметр  $E_p$  равен нулю. Рассмотрим на примере как изменяются деформационные характеристики пород после проведения тампонажа в породах с хаотической трещиноватостью в зонах тектонических нарушений при невыполнении условия  $\delta < h$ .

В этом случае расчет произведен с учетом ползучести горной породы при  $\alpha = 1,1$ ;  $\beta = 20$ ;  $\sigma = 1$  МПа. Следует отметить, что при медленном нарастании нагрузки происходит постепенное уплотнение раствора без возникновения поперечных деформаций, поэтому при расчёте коэффициента Пуассона для системы „блок-затампонируемая трещина“ реологические свойства породы не учитывались.

При определении модуля деформации глиноцементного раствора воспользуемся данными табл. 1.

Модуль деформации для глиноцементного раствора ( $\gamma = 1,2$  г/см<sup>3</sup>;  $\Pi = 150$  г/л) за 12 часов стабилизации равен 14,3 МПа; за 24 часа стабилизации –  $E_p = 32,4$  МПа.

Коэффициент Пуассона затампонируемых пород по сравнению с трещиноватыми увеличивается в 3–10 раз.

Для дальнейшего расчета приняты соответственно значения  $E_p$ : 15 и 33 МПа. Расчетные значения модуля деформации трещиноватых систем с тампонажным раствором представлены в виде графиков на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей и расчетных данных показывает, что увеличение раскрытия трещин, при незначительном различии модулей деформации блоков сравниваемых пород, приводит к многократному (до 50 раз) снижению модуля деформации пород с трещинами; наличие скальных контактов практически не влияет на модуль деформации затампонируемых пород (значения отличаются на 7–12%); тампонаж глиноцементными растворами значительно (в 3–10 раз) повышает модуль деформации трещиноватых и раздробленных пород. Большая величина соотношения соответствует породам с меньшим модулем деформации. Следовательно, тампонаж дизъюнктивных зон в 10 раз повышает их устойчивость и обеспечивает проведение горных выработок в этих зонах.

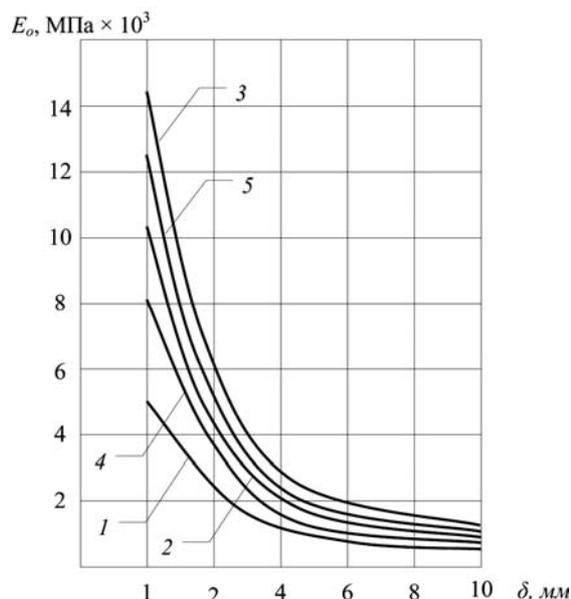


Рис. 1. Зависимость модуля деформации пород от раскрытия трещин: 1 – трещины без раствора; 2 – затампонируемые трещины со скальными контактами и раствором с  $E_p = 15$  МПа; 3 – затампонируемые трещины со скальными контактами и раствором с  $E_p = 33$  МПа; 4 – затампонируемые трещины без скальных контактов и раствором с  $E_p = 15$  МПа; 5 – затампонируемые трещины без скальных контактов и раствором с  $E_p = 33$  МПа

**Список литературы:**

1. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт: Учебное пособие / Кипко Э.Я., Должиков П.Н., Дудля Н.А. и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Д.: Национальный горный университет, 2004. – 415 с.
2. Глиноцементные тампонажные растворы в горном деле. / Дудля Н.А., Тельных Н.Н., Попов А.В., Цаплин Е.Г. – Д.: НГУ, 2004. – 191 с.

3. Э.Я. Кипко, П.Н. Должиков, В.Д. Рябичев. Комплексная технология ликвидации наклонных горных выработок: Монография – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 220 с.
4. Руппелейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975. – 223 с.

Аналітично отримано загальне рівняння, що враховує деформацію порід, скальних контактів і заповнювача тріщин – для системної і хаотичної тріщиноватості. На основі експериментальних досліджень деформаційних властивостей глиноцементних розчинів для затампованих порід встановлені залежності коефіцієнта Пуассона і модуля деформації від розкриття тріщин, показано їх збільшення у 3–10 разів, що підвищує стійкість породного масиву.

**Ключові слова:** *породи, тріщини, розчин, тампонаж, модуль деформації*

General equalization, which takes into account deformation of rocks, rocky contacts and filler of fissure – for system and chaotic fissure state has been gained analytically. On the basis of experimental research of deformation properties of cement-clay grouts for grouted rocks, dependences of Poisson's ratio and module of deformation from crack opening have been set, their 3–10-fold increase which rises stability of rock massif has been shown.

**Keywords:** *rocks, fissures, grout, grouting, module of deformation*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.М. Шауенком 25.04.10*

## Національний гірничий університет пропонує інноваційний проект

### СИСТЕМА ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ Й УПРАВЛІННЯ ПІДЗЕМНИМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

**Автори:** Півняк Г.Г., академік НАН України, Заїка В.Т., д-р техн. наук, проф.

**Спрямованість проекту:** розробка інтелектуального обладнання для забезпечення ефективності електровикористання і надійності функціонування електропостачання промислових дільниць та комплексів вугільних шахт.

**Сфера застосування:** інтелектуальне обладнання (далі САУПЕШ) призначене для енергетичного контролю та автоматизованого управління і діагностики високовольтного комплектного розподільного устаткування систем електропостачання (СПЕП) підземних технологічних комплексів вугільних шахт, у тому числі небезпечних через можливість вибуху пилу та газу.

**Короткий опис:** відправною точкою для створення САУПЕШ є те, що теоретичні залежності дають велику похибку при визначенні енергетичних параметрів гірничих машин і установок, якщо їх застосовувати без урахування конкретних гірничотехнічних умов, що звичайно через трудомісткість і робиться. Тому, при енергетичному обстеженні споживання гірничих комплексів та установок запропоновано представляти у вигляді регресійних моделей, які при експлуатації можливо постійно уточнювати і використовувати для управління енергоефективністю за допомогою системи САУПЕШ. „НОУ–ХАУ“ при розробці інструментальних програм для САУПЕШ є застосування нового методу для вимірювання й обчислення енергетичних параметрів електроспоживання гірничих машин і установок, що спирається на дискретні обчислювальні моделі, в основі яких лежить поворот векторів напруги і струму на будь-який заданий кут програмним способом. Це єдиний дієвий спосіб в умовах обмеження кількості первинних датчиків струму і напруги в існуючому вибухозахищеному електромережному обладнанні. Основи методу захищені авторським свідоцтвом. Ці наукові результати дозволили розробити систему, яка має знижене власне енергоспоживання, забезпечує потрібну глибину контролю, високу надійність контролю й управління, а також задовільну точність обліку і контролю електроспоживання, що дозволяє організувати оперативне управління енергозбереженням на раніше недоступній ділянці гірничого виробництва.

**Показники ефективності:** у цілому по галузі очікується зниження витрат та втрат електроенергії приблизно на 4,5% (300–350 млн кВт. год/рік) і підвищення надійності роботи СПЕП за рахунок зниження тривалості перерв електропостачання на виробничих дільницях у середньому на 50 годин на шахту на рік. Крім всього, за рахунок моніторингу режимів роботи устаткування, істотно підвищиться безпека праці на всіх дільницях підземного виробництва.

**Вплив на навколишнє середовище:** при експлуатації системи забруднення навколишнього середовища не відбувається.

**Вартість реалізації проекту:** 250 тис EURO. Вартість системи залежить від складності технологічного комплексу і в середньому становить від 15 до 20 тис EURO за 1 технологічний комплекс.

**Термін реалізації та окупності:** реалізація – 18 міс., окупність – 12–15 міс.

**Контакти:** тел.: +38 (0562) 46-40-62, факс: (056) 744-62-11, e-mail: nmu@nmu.org.ua; <http://www.nmu.org.ua>