

цветных, редких, благородных металлов и т.д. Как отмечалось выше, подземная геотехнология характеризуется большими потерями полезного ископаемого в недрах. Так, при отработке месторождений железных и медных руд по различным оценкам специалистов в недрах остается до 50% запасов металла.

Одним из основных направлений снижения потерь минерального сырья, оставляемого в недрах при отработке месторождений традиционными способами – физико-технической геотехнологией, является доизвлечение их геохимическими методами. Эффективность применения физико-химической геотехнологии во многом определяется степенью подготовленности минерального сырья к разработке.

На Урале имеется целый ряд старых медных рудников (Гумешевский, Зюзельский, Дегтярский и др.), оставшиеся в недрах запасы которых предусматривается отрабатывать физико-химической технологией. Но основные запасы руды остаются в целиках, что существенно снижает эффектив-

ность вовлечения их в геохимические методы извлечения – необходима их предварительная подготовка на стадии закрытия рудника.

При подземном выщелачивании подготовка оставляемых в недрах запасов заключается в предварительном дроблении их взрыванием глубоких скважин. Блоки выщелачивания готовятся как с использованием пройденных выработок, так и проходкой с оборудованием специальных выработок.

Перспективность технологий с выщелачиванием металла доказана опытом отработки Саданских месторождений, Быкогорским урановым месторождением и т.д.

Формирование сопутствующих техногенных минеральных образований в подземных выработках, исходя из способа их дальнейшей разработки и предварительной подготовки оставшихся запасов в недрах для физико-химической геотехнологии их отработки, должно предусматриваться при разработке в целом стратегии отработки месторождения.

Библиографический список

1. Чантурия В.А., Чаплыгин Н.Н., Вигдергауз В.Е. Ресурсосберегающие технологии переработки минерального сырья и охрана окружающей среды // Горный журнал. 2007. № 2.
2. Каплунов Д.Р. Задачи широкомасштабного внедрения комбинированной геотехнологии // Материалы Междунар. науч.-техн. конференции «Комбинированная геотехнология: масштабы и перспективы применения». М., 2000.

УДК 622.02:539.2/8

Хлусов А.Е.

О ПОЛЗУЧЕСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ПОРОДНОЙ БАЛКИ

При проектировании и эксплуатации горных выработок обеспечение их устойчивости является важнейшей задачей. И в первую очередь это относится к кровле выработки, поскольку от ее состояния напрямую зависит безопасность работ. Для правильного выбора крепи выработки (особенно в случае ее длительной эксплуатации) необходимо знание величины ожидаемых смещений кровли. Если последняя представлена слоем однородной породы, то при условии постоянства величины действующей нагрузки задача имеет известные решения [1–4]. Однако в подавляющем большинстве кровля выработки неоднородна и состоит из нескольких слоев пород различного литологического состава. Вопрос определения величины смещений такой кровли, находящейся в состоянии ползучести, остается открытым. В данной статье рассматривается подход к решению указанной за-

дачи, основанный на аналогии работы кровли выработки (как многослойной плиты) и выделенной из ее средней части многослойной балки-полоски, состоящей из разнородных пород и испытывающей цилиндрический изгиб.

Возьмем монолитную многослойную неоднородную балку, находящуюся под длительным действием изгибающей нагрузки, и рассмотрим деформирование ее элемента $edpk$, образованного проведением на бесконечно малом расстоянии друг от друга двух поперечных сечений (рис. 1, а). Если условиться, что при изгибе балки происходит поворот сечений вокруг ее нейтральной оси $N-N$, то поперечное сечение $e-d$, изначально (т. е. сразу после приложения нагрузки) занимавшее положение e_0-d_0 , через некоторое время t дополнительно повернется на некоторый угол и примет положение e_t-d_t . При этом будем считать, что породные слои,

находящиеся по одну сторону ее нейтральной оси (h_p), одномерно растягиваются, а по другую (h_c) – одномерно сжимаются (в качестве примера на рисунке показан временной рост деформации растяжения волокна 1–1 от величины $(\epsilon_{pl})_o$ до значения $(\epsilon_{pl})_t$, а также деформации сжатия волокна 3–3 соответственно от $(\epsilon_{c3})_o$ до $(\epsilon_{c3})_t$). Таким образом, закономерность изменения во времени прогиба многослойной балки можно выразить через закономерности развития деформаций ползучести ее пород при сжатии и растяжении вдоль слоистости. Следовательно, сначала необходимо рассмотреть ползучесть однородного образца, находящегося в одномерном напряженном состоянии.

Горные породы (и в первую очередь породы осадочного происхождения), как известно, идеально-упругими свойствами не обладают, поскольку во многом являются телами упруго-пластичными. Это свойство, отражающееся в нелинейности диаграммы нагружения, выразим следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} \sigma_{co} &= E_{co} \cdot \epsilon_o^a, \\ \sigma_{po} &= E_{po} \cdot \epsilon_o^a, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{co} , E_{co} и σ_{po} , E_{po} – напряжение и модуль деформации породы при условно-мгновенном сжатии и растяжении соответственно; a – параметр, отражающий пластические свойства породы. Причем, $a < 1$, а $E_{co} > E_{po}$.

При длительном нагружении у горной породы проявляются реологические свойства, выражающиеся в изменении механических характеристик. Эксперименты показывают, что изохронные кривые, отражающие характер зависимости между напряжениями и деформациями ϵ_t в конкретный

момент времени t (рис. 2), могут быть описаны функцией вида (индексы c и p опускаем):

$$\sigma_t = E_t \cdot \epsilon_t^{a_t}, \quad (2)$$

где σ_t , E_t и a_t – напряжение, модуль деформации и параметр пластичности породы в момент времени t . Найденные в разные моменты времени t величины E_t и a_t говорят о том, что

$$\begin{aligned} E_o &> E_{t_1} > E_{t_2} > \dots; \\ a_o &> a_{t_1} > a_{t_2} > \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку экспериментальные данные фиксируют незначительное временное изменение параметра a_{it} , то с целью упрощения выкладок далее примем, что $a_t \approx a_o = a = \text{const}$.

Если функцию ползучести образца i -й породы, испытывающего простое сжатие или растяжение, искать в виде

$$\frac{\epsilon_{it}}{\epsilon_{io}} = \psi_{\epsilon_i}(t), \quad (4)$$

а закон снижения во времени ее модуля деформации в виде

$$\frac{E_{it}}{E_{io}} = \psi_{E_i}(t), \quad (5)$$

то совместное решение этих уравнений дает следующую зависимость, описывающую нелинейную ползучесть данной породы:

$$\psi_{\epsilon_i}(t) = \frac{1}{[\psi_{E_i}(t)]^{1/a_i}}. \quad (6)$$

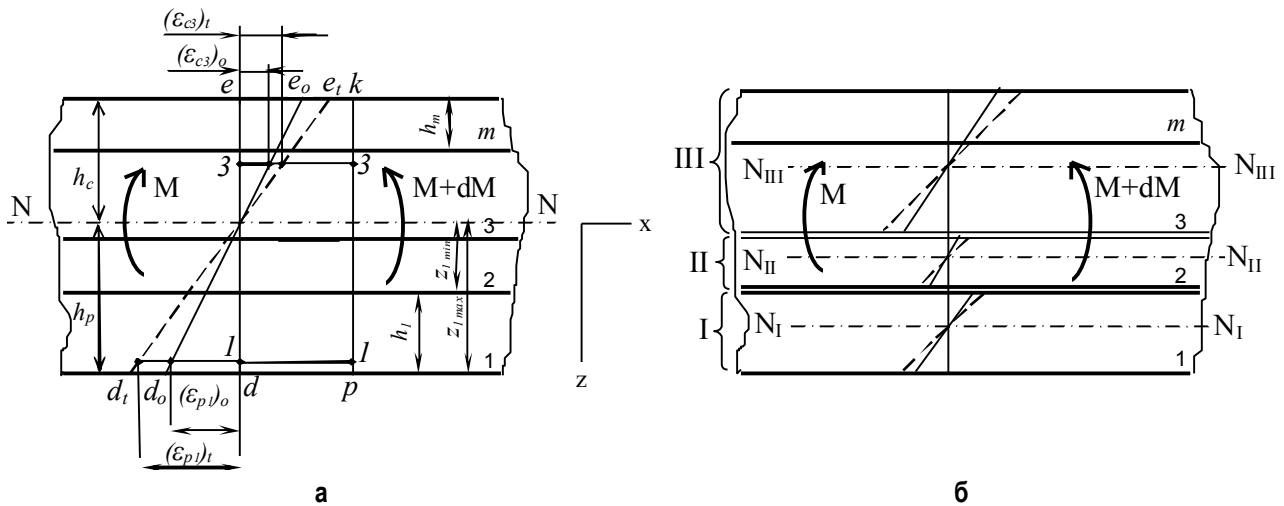


Рис. 1. Схема, поясняющая расчет деформаций ползучести многослойной монолитной (а) и расслоившейся (б) балки

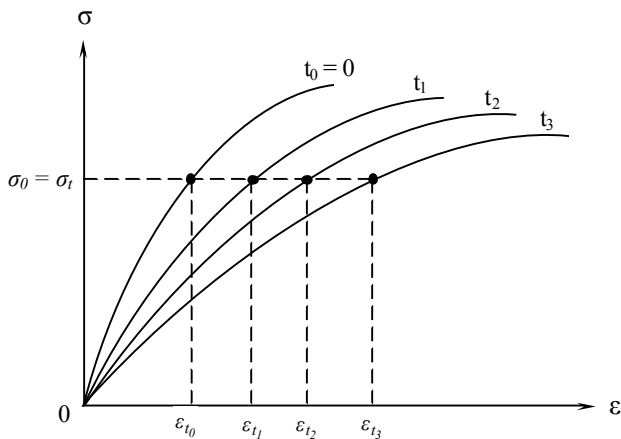


Рис. 2. Изохронные диаграммы одноосного нагружения породных образцов

Как показывают эксперименты, функция $\psi_{E_i}(t)$, характеризующая временное изменение величины модулей деформации породы, может быть выражена при помощи разностного ядра Абеля следующим образом:

$$\psi_{E_i}(t) = \frac{1}{1 + \frac{\delta_{E_i}}{1 - \alpha_{E_i}} \cdot t^{1 - \alpha_{E_i}}}, \quad (7)$$

где α_{E_i} и δ_{E_i} – параметры снижения во времени модуля деформации i -й породы. Очевидно, что при $\alpha_i = 1 = \text{const}$ $\alpha_{E_i} = \alpha_i$ и $\delta_{E_i} = \delta_i$, если α_i и δ_i – параметры линейной ползучести этой породы.

Теперь вернемся к многослойной неоднородной балке, состоящей в силу условий (1) из неупругих пород и находящейся в состоянии сначала условно-мгновенного, а затем длительного изгиба.

Записав условия равновесия для момента времени $t = 0$, выражающиеся в том, что суммарная осевая сила, действующая в поперечном сечении балки, равна нулю, а приложенные к сечению моменты внешних и внутренних сил равны между собой [5], получим следующую интересующую нас зависимость между максимальным изгибающим моментом M^{\max} , максимальной кривизной χ_o^{\max} и неупругим мгновенным прогибом f_o середины балки:

$$f_o = \chi_o^{\max} \cdot A \left[\frac{M^{\max}}{\sum_{p,c} (E_i \cdot I_i^*)_o} \right]^{\frac{1}{a_{cp}}} \cdot A, \quad (8)$$

где A – коэффициент, зависящий только от вида нагрузки и конструкции опор (например, при жестком защемлении равномерно нагруженной балки $A = \ell^2/32$, при свободном оперании – $A = 5\ell^2/48$, где ℓ – ее пролет).

Знаменателем дроби (8) является величина жесткости неупругой многослойной балки при условно-мгновенном изгибе, определяемая как:

$$\left(\sum_{p,c} E_i \cdot I_i^* \right)_o = \sum_p (E_{pi})_o \cdot I_i^* + \sum_c (E_{ci})_o \cdot I_i^*. \quad (9)$$

Здесь первое слагаемое представляет собой сумму жесткостей сечений слоев, расположенных в растянутой зоне балки, второе слагаемое – расположенных в зоне сжатия. Величина момента инерции сечения i -го слоя находится из выражения:

$$I_i^* = b_i \cdot \frac{z_{i \max}^{a_i+2} - z_{i \min}^{a_i+2}}{a_i + 2}, \quad (10)$$

где b_i и h_i – ширина и мощность i -го слоя; $z_{i \max}$ и $z_{i \min}$ – координата границы его мощности соответственно максимально и минимально удаленной от нейтральной оси балки. Очевидно, что $z_{i \max} - z_{i \min} = h_i$ (на рис. 1, а это продемонстрировано для слоя № 1); a_i – величина показателя пластичности породы i -го слоя.

Поскольку все a_i – это дробные числа, меньшие единицы, то, немного поступившись точностью вычислений, их среднее значение a_{cp} находится из выражения

$$a_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^m a_i \cdot E_i \cdot I_i^*}{\sum_{i=1}^m E_i \cdot I_i^*}, \quad (11)$$

где m – количество слоев в балке.

Если в некоторый момент времени t балка, прогнувшись до величины f_t , не разрушилась, то условия ее равновесия, использовавшиеся для вывода формулы (8), остаются справедливыми и здесь. Тогда, с учетом зависимости (2), прогиб f_t может быть найден следующим образом:

$$f_t = \chi_t^{\max} \cdot A \left[\frac{M^{\max}}{\sum_{p,c} (E_i \cdot I_i^*)_t} \right]^{\frac{1}{a_{cp}}} \cdot B. \quad (12)$$

Знаменатель этой дроби представляет собой жесткость сечения в момент времени t , которая зависит, в том числе, и от положения нейтральной оси балки. Результаты экспериментов показывают, что у длительно нагруженной балки происходит смещение ее нейтральной оси, вызванное тем, что скорость ползучести породы при растяжении несколько больше, чем при сжатии. Однако эти изменения невелики (около 5–10% за год), и, думается, с целью упрощения расчетов ими можно пренебречь. Исходя из этого, моменты инерции сечения слоев балки могут считаться постоянными во времени, следовательно, временное уменьшение жесткости балки можно объяснять только снижением величины модулей деформации породы при сжатии и растяжении. Тогда, с учетом (5), запишем:

$$\left(\sum_{p,c} E_i \cdot I_i^* \right)_t = \sum_p (E_{pi})_o \cdot I_i^* \cdot \psi_{E_{pi}}(t) + \sum_c (E_{ci})_o \cdot I_i^* \cdot \psi_{E_{ci}}(t), \tag{13}$$

где $(E_{pi})_o$ и $(E_{ci})_o$ представляют собой значения модулей деформации породы i -го слоя при условно-мгновенном растяжении или сжатии (в зависимости от того, в какую зону слой попадает), а функции $\psi_{E_{pi}}(t)$ и $\psi_{E_{ci}}(t)$, определяемые экспериментально, отражают временное снижение этих модулей.

Таким образом, относительное увеличение прогиба породной балки в результате ее ползучести с учетом равенств (12) и (8) определится функцией

$$\psi_f(t) = \frac{f_t}{f_o} = \left[\frac{\sum_{p,c} (E_i \cdot I_i^*)_o}{\sum_{p,c} (E_i \cdot I_i^*)_t} \right]^{\frac{1}{a_{cp}}}. \tag{14}$$

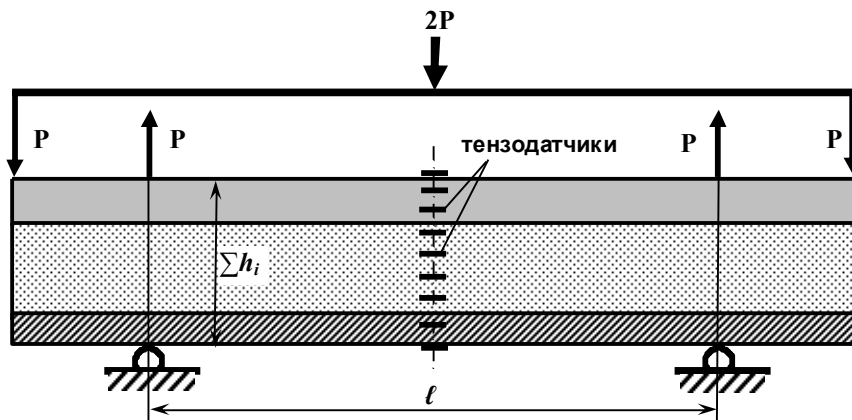


Рис. 3. Схема длительно нагружения многослойной балки

Это выражение носит общий характер, поскольку отражает увеличение во времени прогиба неупругой породной балки через уменьшение во времени величины жесткости ее сечения. Поэтому полученное для монолитного образца, у которого существует одна нейтральная ось, оно может быть использовано и для прогнозирования величины деформаций ползучести немонолитной (расслоившейся) балки, имеющей уже несколько нейтральных осей (рис. 1, б). В этом случае числитель дроби (14) будет представлять собой сумму жесткостей сечений монолитных отдельных (слоев или группы слоев, на которые произошло расслоение балки), а знаменатель дроби – эту же величину жесткости, но скорректированную с учетом фактора времени (5). Заметим, что здесь величина жесткости у каждой монолитной отдельности находится относительно своей нейтральной оси (например, на рис. 1, б их – три). При этом трение между слоями в расчет не берется.

С целью проверки полученных выше формул, описывающих деформирование многослойной породной балки во времени, были проведены лабораторные эксперименты, заключавшиеся в длительном нагружении неоднородных брусков постоянными изгибающими нагрузками и замере прогибов. Испытаниям подвергались только монолитные балки.

При выборе горных пород для моделей-балок мы исходили из того, что диапазон изменения их механических свойств должен быть характерен для пород осадочного происхождения. В связи с этим для экспериментов были выбраны горючий сланец, мрамор и известняк, прочность на изгиб которых равна от 4 до 12 МПа. Многослойные модели изготавливались путем склеивания силикатным клеем двух–трех однослойных балок с последующей просушкой в течение двух недель и более. Прочность клея была достаточной для исключения расслоения модели в течение всего опыта. Для того, чтобы применение теории изгиба было правомерно, отношение пролета l балки к ее суммарной высоте Σh_i было не менее четырех.

Испытания проводились в условиях поперечного изгиба балки, свободно лежащей на двух опорах (рис. 3). Изгиб производился двумя моментами, приложенными к ее концам, нагрузка $2P$ задавалась с помощью рычагов с подвешенными на них грузами, прогиб середины f замерялся индикатором часового типа. Количество испытанных моделей составило 10 штук, длитель-

ность эксперимента – несколько месяцев. Во избежание высыхания образцы покрывались гидроизоляционным составом.

В начале проверялось, можно ли применять гипотезу плоских сечений для расчета длительно нагруженной неоднородной балки, породные слои которой имеют разные механические и реологические свойства. То есть выяснялось, остаются ли во времени поперечные сечения разнородной монолитной балки плоскими. Для этого в середине пролета моделей на боковую поверхность по всей ее высоте наклеивались тензодатчики, подключаемые затем к электронному измерителю дефор-

маций. С его помощью по мере нагружения балок вычислялись относительные деформации их волокон, расположенных на разной высоте, и определялось положение нейтральной оси.

Результаты испытаний показали, что распределение относительных деформаций вдоль поперечного сечения модели остается во времени линейным (рис. 4), сами сечения – плоскими, а смещение нейтральной оси модели, происходящее вследствие разности реологических свойств пород, – незначительно и его можно не учитывать. Это допущение позволяет принять момент инерции сечения неизменным во времени, а развитие процесса ползуче-

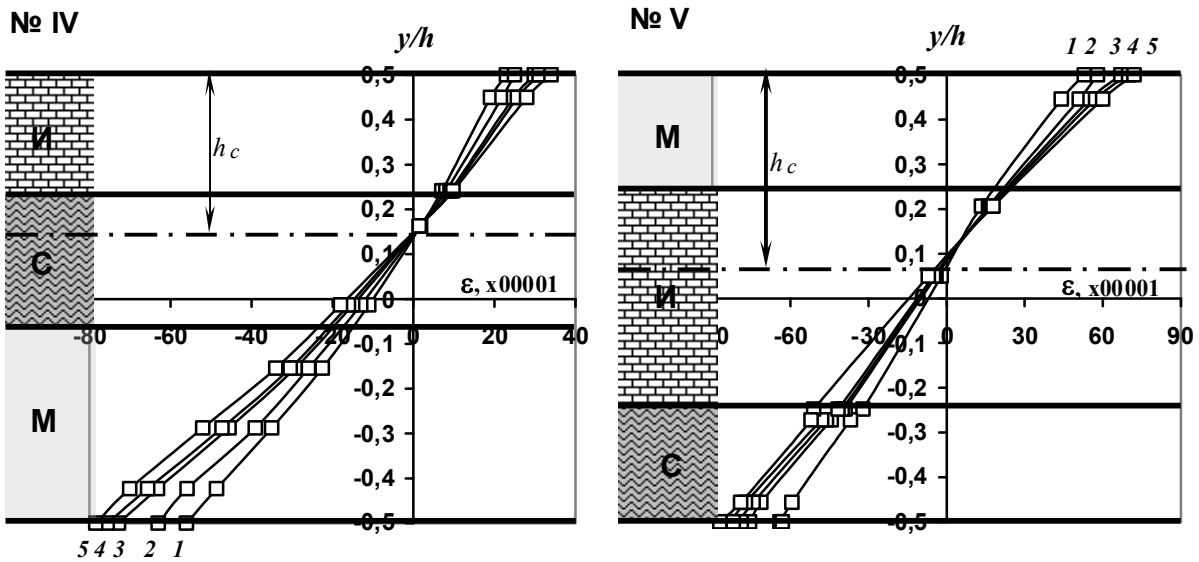


Рис. 4. Эпюры распределения относительных деформаций вдоль поперечного сечения длительно нагруженных многослойных балок (по результатам испытаний двух образцов) в разные моменты времени: 1 – 0 ч; 2 – 1 ч; 3 – 1 сут; 4 – 30 сут; 5 – 60 сут; И – известняк; С – горючий сланец; М – мрамор

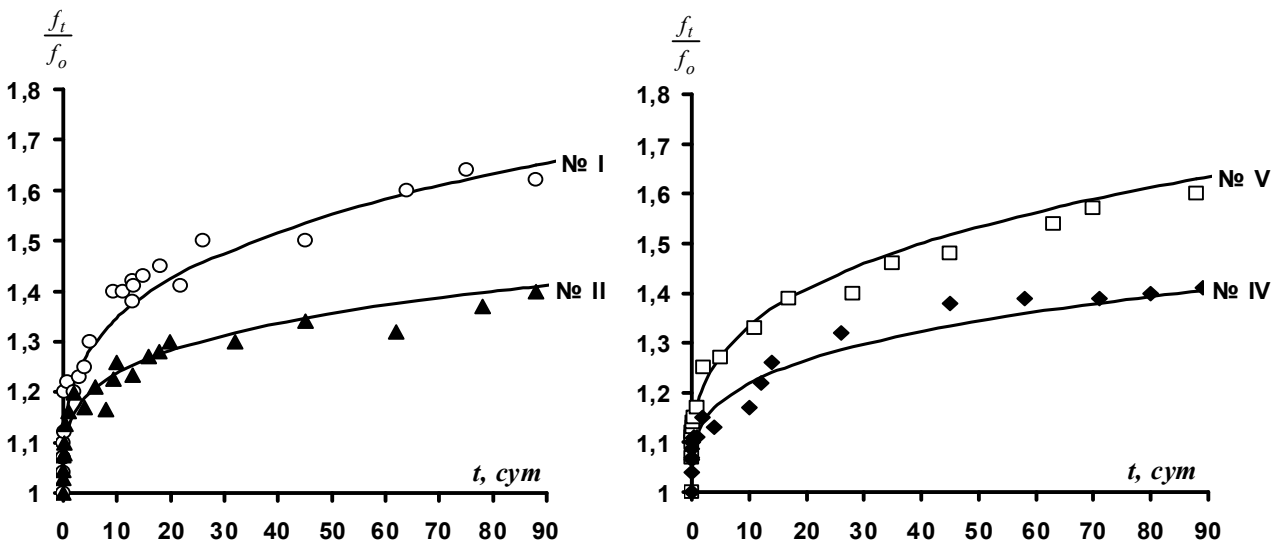


Рис. 5. Опытные (○, ▲, □, ◆) и теоретические (—) кривые ползучести многослойных балок (по результатам испытаний четырех образцов)

сти многослойной модели объяснять уменьшением во времени величины жесткости каждого ее слоя, происходящим по закону снижения во времени модуля деформации данной породы. На **рис. 5** приведены опытные графики ползучести длительно нагруженных многослойных балок и теоретические кривые, построенные по формуле (14).

Поскольку разброс реологических характеристик пород обычно значителен, то с целью минимизации влияния этого фактора на результаты экспериментов был проведен тщательный отбор однослойных образцов по результатам их предварительного нагружения. Приходится признать, что смена времен года с изменением температу-

ры и влажности окружающей среды отрицательно отражается на результатах экспериментов. Поэтому на рисунке графики ползучести многослойных балок приведены в пределах одного сезона, климатические характеристики которого условно можно считать постоянными. Максимальное отклонение теоретических кривых от экспериментальных за данный промежуток времени не превышает 15%.

Задачей дальнейших исследований является изучение влияния сил трения, действующих по контактам пород расслоившейся неоднородной балки, скрепленной сталеполимерными анкерами, на величину ее деформации ползучести.

Библиографический список

1. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата: Наука, 1964. 175 с.
2. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
3. Малинин Н.Н. Основы расчетов на ползучесть. М.: Машгиз, 1948.
4. Качанов Л.М. Теория ползучести. М.: Физматгиз, 1960.
5. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.

УДК 622.794.22

Кутлубаев И.М., Садыков В.Х., Третьяк Б.А., Козырь А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАГЕНТОВ НА ВЛАЖНОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ ВАКУУМНОМ ФИЛЬТРОВАНИИ

Методом вакуумного фильтрования из железорудных концентратов (ЖРК) удаляется влага: свободная, осмотически связанная, канатного, до 70% стыкового состояния. Для полного удаления влаги создаваемой разности давлений на фильтре недостаточно. Для преодоления связи воды с твердыми частицами требуется создание более значительных сил, а следовательно, и большей энергии.

Известны исследования, направленные на использование катионных и анионных поверхностно-активных веществ для улучшения процесса обезвоживания*.

Для установления возможности уменьшения энергии связи воды с твердыми частицами ЖРК за счет использования различных реагентов была выполнена серия экспериментов. Выбор реагентов определялся целесообразностью их присутствия в кеке в последующих переделах. Кроме того, исследовалось влияние низкомолекулярных реагентов.

Для получения сравнительных оценок фильтрационных характеристик суспензий проведены ис-

следования по фильтрованию на установке «Filtratest». Удельная поверхность исследуемого концентрата – 1587–1600 см²/г. Содержание классов крупностью +0,074 мм составляло 1,2%, классов – 0,074 +0,05 мм – 2,8%, классов – 0,05 +0,02 мм – 68,7%, классов – 0,02 – 27,3%. Плотность твердой фазы была равна 4,8 т/м³. Фильтрование осуществлялось на фильтровальной ткани ЗАО "Воскресенск-Техноткань", арт.0597/106. Содержание твердого в суспензии составляло 53%. Постоянными внешними условиями были параметры окружающей среды: влажность, равная 65%; температура 23°C.

Исследовался процесс отстаивания суспензии рядового ЖРК (**рис. 1**) и с флюсующей добавкой – известкового молока (ИМ) с концентрацией СаО 15–30% (**рис. 2**).

Сравнительный анализ полученных зависимостей показывает:

– скорости расслаивания и уплотнения осадка для суспензии рядового ЖРК составляют 0,226 и 0,34 мм/с соответственно;

– скорости расслаивания и уплотнения осадка для суспензии рядового ЖРК с добавкой ИМ составляют 0,192 и 0,31 мм/с соответственно.

* Singh Bimal P. The role of surfactant adsorption in the improved dewatering of fine coal// Fuel. 1999. 78, № 4. P. 501–506.