Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т. XXXII, 1980 г.

УДК 622.271

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ УСТОЙЧИВОГО СОСТОЯНИЯ УСТУПА КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В.А.ПАДУКОВ, С.В.КИРЮКОВ

В практике ведения открытых горных работ нередко возникают положения, когда устойчивое состояние участка уступа или борта карьера должно сохраняться только в течение определенного, часто весьма небольшого промежутка времени. По истечении этого периода может происходить оползание или сбрушение уступа, что не будет сказываться на ведении горных работ в карьере. При этом нет необходимости формировать уступ согласно условиям длительного сохранения устойчивости. Можно увеличить угол наклона откоса уступа, обеспечивая при этом устойчивость в течение требуемого времени. Этим достигается экономия средств за счет уменьшения объема вскрыши и упрощения технологии отбойки и выемки породы.

Методики расчета устойчивости уступов карьеров, основанные на силовых моделях оползнеобразования при равенстве сдвигающих и удерживающих сил, не позволяют прямо рассчитать продолжительность устойчивого состояния уступа, поскольку время не входит в основные зависимости.

Термодинамическая модель оползнеобразования включает в себя как основной фактор время развития оползня. В основу термодинамической модели положена теория акад.С.Н.Журкова о кинетической природе прочности твердых тел.

С точки зрения кинетической теории разрушение или деформация начинается с разрыва межмолекулярных связей в твердом теле под действием собственных тепловых колебаний атомов. Частота этих разрывов носит вероятностный характер и зависит от температуры и природы тела. При отсутствии внутренних напряжений разорванные связи восстанавливаются почти полностью. Если к телу приложена нагрузка, то часть связей не восстанавливается, причем чем больше нагрузка, тем больше становится невосстановленных связей.

При достаточном количестве накопленных микроразрывов тело начинает деформироваться. Время, проходящее с момента приложения нагрузки до момента разрушения, зависит от напряжения, температуры и природы вещества.

В работе [3] приводится эмпирическая формула, полученная после обработки результатов испытаний, проведенных на различных образцах (металлы, соли, пластмассы) при разных значениях температуры и напряжения:

$$\tau=\tau_0 \exp \frac{U_0-\gamma\sigma}{kT}, \qquad (1)$$

где τ - долговечность (время, прошедшее от момента приложения нагрузки до момента разрушения); τ_0 - условная долговечность тела (время существования при условии, что разорванные связи между атомами не восстанавливаются), равна времени собственных колебаний атомов, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с; U_0 - энергия, необходимая для распада одной межатомной связи (энергия активации распада межатомных связей); γ - коэффициент, учитывающий степень концентрации напряжений на отдельных связях, минимальные значения отвечают случаю равномерного распределения напряжений по всем межатомным связям; σ - нормальное напряжение; k - постоянная Больцмана, $k = 1{,}380 \cdot 10^{-33}$ Дж/к; T - температура по Кельвину.

Величина τ_0 весьма мала, тогда как показатель экспоненты очень велик и зависит от σ, поэтому график $\tau(\sigma)$ при постоянстве остальных параметров принимает вид, близкий дельфа-функции. Небольшое увеличение напряжения приводит к тому, что время разрушения меняется от очень больших значений до очень малых. Видимое разрушение наступает при достижении σ определенного значения.

Формула (I) предложена для общего случая разрушения твердого тела, без учета его природы и особенностей. Возникает вопрос о возможности ее применения к процессу разрушения массива горных пород.

Величины τ_0, U_0 и особенно γ находить весьма сложно. Необходим параметр, который бы определял степень нарушенности структуры тела. Таким параметром может служить удельная энтропия формирующегося оползня.

В рассматриваемый нами начальный период деформирования уступа, до появления поверхности скольжения, систему можно считать упруговязкой и в качестве обобщенных сил использовать напряжение, а в качестве обобщенных координат - деформацию:

$$m\frac{d^2\varepsilon}{dt^2}+\lambda\frac{d\varepsilon}{dt}+k\varepsilon=F(t), \qquad (2)$$

где $m\frac{d^2\varepsilon}{dt^2}$ - инерционные силы; $\lambda\frac{d\varepsilon}{dt}$ - силы вязкого трения; $k\varepsilon$ - силы упругости; ε - относительная деформация; m - масса; λ - вязкость.

Для необратимых процессов в изолированной системе справедливо следующее определение энтропии:

$$dS = dQ/T, \qquad (3)$$

где dQ - диссипативная энергия, обуславливающая разрыв межатомных связей, $dQ=Fd\varepsilon$.

Скорость изменения энтропии имеет вид

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\lambda}{T}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)^2. \qquad (4)$$

Интегрируя по t, получим

$$S = \int_0^t \frac{\lambda}{T}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)^2 dt, \qquad (5)$$

при постоянных T и λ

$$S = \frac{\lambda}{T}\int_0^t \dot{\varepsilon}^2(t)\,dt. \qquad (6)$$

Зная вид $\dot{\varepsilon}(t)$ и величину критической энтропии S^*, можно определить время устойчивости уступа t^*.

К определению S^* можно подойти, исходя из следующих рассуждений:

$$dS = dQ/T = (dU - \sigma\,d\varepsilon)/T, \qquad (7)$$

где dQ - приращение энергии диссипации; dU - приращение полной энергии; $\sigma\,d\varepsilon$ - приращение упругой энергии; $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon}\right)_T d\varepsilon + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_\varepsilon dT$; $\varepsilon = \sigma/E + \alpha T$; $\left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon}\right)_T$ — напряжение при постоянной температуре, $\left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon}\right) = E\varepsilon$; $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_\varepsilon$ - теплоемкость при постоянной деформации, $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_\varepsilon = c_\varepsilon$; E - модуль упругости; α - коэффициент теплового расширения.

Подставим в определение для dS значения dU и σ и проинтегрируем по T и ε от момента t_0 (T_0, ε_0) до момента t (T, ε), тогда $S = \alpha E\varepsilon - \alpha E\varepsilon_0 + c_\varepsilon \ln T_0 - c_\varepsilon \ln T$ или при постоянной T

$$S = \alpha E(\varepsilon - \varepsilon_0), \qquad (8)$$

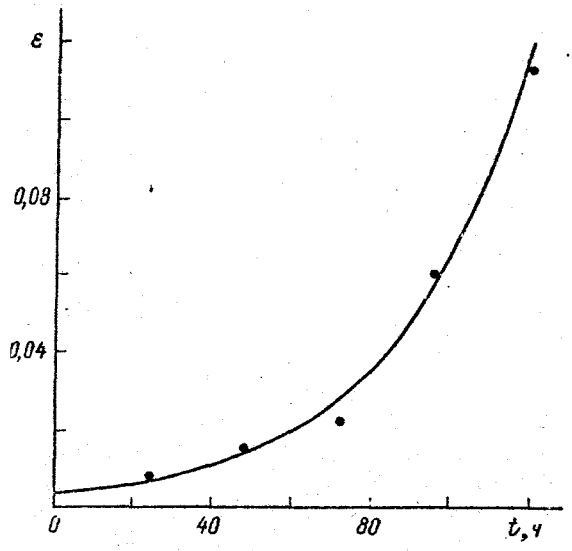
где ε и ε_0 - относительная деформация в момент соответственно t и t_0, $\varepsilon_0 = 0$.

В работе [I] проанализированы исследования по определению критических значений ε. Этот показатель у различных исследователей колеблется в пределах 0,018-0,023. Рекомендуется принимать $\varepsilon = 0{,}02$.

Критическое значение удельной энтропии $S^* = 0{,}02\alpha E$. Таким образом, через приращение энтропии получаем формулу, связывающую физические свойства породы, слагающей уступ, скорость развития деформации и время от момента формирования уступа до начала активного движения по поверхности скольжения.

Для проверки теоретических положений на карьере Североонежского бокситового рудника были проведены инструментальные наблюдения за оползнеобразованием.

Верхний уступ карьера сложен неустойчивыми песчаными и глинистыми породами. Высота уступа принята равной 15-18 м для того, чтобы разместить очистное оборудование на нижележащей толще устойчивых пород. Отработка ведется экскаваторами типа ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8И. При этом формируется уступ с углом наклона, близким к 90°. Уменьшить угол не позволяет ограниченная длина стрелы экскаватора. Такой уступ с момента формирования находится в неустойчивом состоянии, и обычно по истечении



Изменение относительной деформации уступа во времени

нескольких дней происходит оползень. Предоползневой период сопровождается накоплением в уступе деформаций.

Для определения зависимости скорости деформации от времени по уступу перпендикулярно бровке был размещен ряд реперов с таким расчетом, чтобы последние реперы находились заведомо вне зоны предоползневых деформаций [2]. Ежесуточные измерения расстояний между реперами показали, что предоползневыми деформациями охвачена зона уступа шириной a = 10 м:

$$\varepsilon = x/a\,, \qquad (9)$$

где ε - относительная деформация; x - деформация уступа, м.

Согласно [4] зависимость деформации и скорости деформации от времени на стадии, предшествующей образованию поверхности скольжения, носит экспоненциальный характер. Данные наблюдений были обработаны методом наименьших квадратов для экспоненты. Зависимость $\varepsilon = de^{bt}$ хорошо аппроксимирует результаты измерений (см.рисунок). Дифференцируя по t, получим

$$\dot{\varepsilon} = c\,e^{bt}, \qquad (10)$$

где $c = 9{,}56604\cdot10^{-5}$ ч$^{-1}$; $b = 0{,}03$ ч$^{-1}$.

Примем момент формирования уступа за начало отсчета времени, тогда $t = 0$. Подставим зависимость (10) в формулу (6), тогда

$$S^* = \frac{\lambda}{T}\int_0^{t_p}(ce^{bt})^2 = \frac{\lambda c^2}{2bT}\left(e^{2bt_p} - 1\right) \qquad (11)$$

или

$$t_p = \frac{1}{2b}\ln\left(\frac{0{,}02\,\alpha E\cdot 2bT}{\lambda c^2} + 1\right). \qquad (12)$$

Подставим в формулу (12) значения физических свойств, характерные для слагающих уступ пород: $\alpha = 10^{-5}$ К$^{-1}$; $T = 3\cdot10^2$ К; $\lambda = 3\cdot10^6$ Н·ч/м^2; $E = 10^7$ Па, тогда

$$t_p = \frac{1}{0{,}03\cdot2}\ln\left(\frac{2\cdot10^{-2}\cdot10^{-5}\cdot10^7\cdot2\cdot3\cdot10^{-2}\cdot3\cdot10^2}{3\cdot10^6\cdot9{,}56604^2\cdot10^{-10}} + 1\right) = 118{,}17 \text{ ч.}$$

Фактически оползень произошел через 148 ч после формирования уступа. Несовпадение на 30 ч, или на 25%, по-видимому, объясняется влиянием слоя растительности и торфа толщиной до 1,5 м, связывающего деформирующийся уступ.

Таким образом, на основании термодинамической модели процесса оползнеобразования предложен метод расчета продолжительности устойчивого состояния уступа до момента образования поверхности скольжения. Недостаток предложенного метода состоит в том, что используемую в нем зависимость скорости деформации от времени необходимо находить для каждого конкретного случая. Метод может совершенствоваться путем разработки бесконтактных способов определения скорости деформации массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М., Высшая школа, 1978.

2. Инструкция по наблюдению за деформациями уступов, бортов и отвалов карьеров. Л., изд. ВНИМИ, 1971.

3. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974.

4. Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. М., Недра, 1979.