

УДК 539.376; 622.23.01

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ПО ДЕФОРМАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ**

А. М. Коврижных, В. Д. Барышников, А. П. Хмелинин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: amkovr@mail.ru, v-baryshnikov@yandex.ru, hmelinin@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Математическое моделирование процесса ползучести и длительной прочности горных пород осуществляется на основе неассоциированного с поверхностью нагружения Кулона–Мора закона течения. Предлагается единый подход к описанию процессов пластичности и ползучести. Приводится сравнительный анализ теоретических расчетов с данными опытов на различных материалах. При деформировании горных пород в условиях ползучести рассматриваются прикладные задачи о предельном состоянии горного массива при плоской деформации: давление твердого штампа с плоским основанием на породный массив, ограниченный горизонтальной плоскостью и занимающий нижнюю часть полупространства, потеря устойчивости борта карьера или природного склона при действии различных нагрузок. В этих задачах определяются напряжения в зонах предельного состояния и времена разрушения породного массива с учетом внутреннего трения горных пород.

Ползучесть горных пород, длительная прочность, предельная деформация сдвига, дилатансия, время разрушения

DOI: 10.15372/FTPRPI20230604

Горные породы под действием различных нагрузок проявляют свойство ползучести, которое оказывает существенное влияние на процессы деформирования и разрушения. Проблема определения деформаций ползучести и долговечности элементов конструкций и подземных сооружений имеет большое практическое значение.

В классических теориях ползучести принимается гипотеза об отсутствии изменения объема для деформаций ползучести [1–11]. В [6] на основе этой гипотезы решалась задача определения времени разрушения стержня при растяжении. Расчет вполне удовлетворительно согласуется с результатами опытов, однако по данной концепции нагружение цилиндрических образцов при кручении и сжатии не может привести к их разрушению за конечное время. Такой подход не позволяет объяснить хрупкое разрушение материала в условиях ползучести. В [1, 2] предложено кинетическое уравнение Качанова–Работнова для параметра поврежденности, в котором наряду с ростом деформаций ползучести учитывается хрупкое и вязко-хрупкое разрушение в виде образования трещин и пор в различных материалах. В настоящей работе по-

врежденность и трещинообразование предлагается учитывать с помощью сдвиговой модели и коэффициента дилатансии, которые применялись к горным породам в пластических моделях [12–15]. Применение линейной теории наследственности Л. Больцмана к моделированию процессов ползучести различных материалов, в том числе и горных пород, рассматривалось в [3]. Теоретические и экспериментальные исследования процессов необратимого деформирования металлов и горных пород в условиях пластичности и ползучести рассматривались в [1, 2, 16–22]. В [12–15] показано, что критерий Кулона–Мора при длительном действии нагрузки вполне удовлетворительно подтверждается результатами экспериментов на различных материалах. Оказывается, что определяющие соотношения для необратимых деформаций пластичности или ползучести могут быть построены на основе дилатансионно-сдвигового механизма деформирования и закона течения, неассоциированного с поверхностью нагружения Кулона–Мора.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНЫХ ОДНОРОДНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Разрушение в условиях ползучести может иметь различный характер. Нередко оно происходит при значительных удлинениях с образованием шейки — вязкое разрушение. В другом крайнем случае процесс разрушения идет при малых деформациях, т. е. является хрупким. Имеются и смешанные типы разрушения. Для одного и того же материала при одинаковой температуре характер разрушения может изменяться в зависимости от уровня и вида напряженного состояния. Вязкое разрушение при ползучести можно рассматривать как результат неограниченного течения материала. Впервые такой подход был предложен в задаче о ползучести стержня при растяжении с учетом больших деформаций [6]. Этот подход можно интерпретировать как результат неограниченного течения металла при ползучести. В эту схему не укладываются малодеформационные и хрупкие материалы, что является неприемлемым для горных пород. Поэтому в предлагаемом критерии длительной прочности разрушение начинается, когда максимальный необратимый сдвиг достигает предельного значения, характерного для данного материала, что приводит к потере сдвиговой прочности. Предположим, что стержень растягивается в направлении x . В этом случае основные соотношения имеют вид:

$$\dot{\varepsilon}_x^c = \frac{d\Omega}{dt} \sigma_x^n = B \sigma_x^n, \quad \varepsilon_x^c = \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}, \quad \frac{l}{l_0} = \exp(\varepsilon), \quad (1)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_x^c$, $\sigma = \sigma_x$ — абсолютные значения деформации ползучести и напряжения при растяжении; $B = d\Omega/dt$ — коэффициент ползучести; l_0 , l — начальная и текущая длина стержня. При рассмотрении значительных деформаций ползучести естественно пренебрегать упругими деформациями. Так как деформация ползучести происходит без изменения объема, то получим: $lF = l_0F_0$, $F_0/F = l/l_0$, здесь F_0 и F — первоначальная и текущая площади поперечного сечения. Для напряжения σ имеем:

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0} \frac{F_0}{F} = \sigma_0 \frac{F_0}{F} = \sigma_0 \frac{l}{l_0} = \sigma_0 \exp(\varepsilon), \quad (2)$$

P — сила растяжения, действующая на стержень; $\sigma_0 = P/F_0$. Из формул (1), (2) находим:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \sigma_0^n \exp(n\varepsilon) \frac{d\Omega}{dt}, \quad d\Omega = \frac{d\varepsilon}{\sigma_0^n \exp(n\varepsilon)}, \quad \Omega(t_*) = \frac{1}{n\sigma_0^n} \left(1 - \frac{1}{\exp(n\varepsilon_*)} \right), \quad (3)$$

где ε_* — предельная деформация ползучести при разрушении. Из последней формулы (3) по найденному значению $\Omega(t_*)$ определим время разрушения $t_* = \Omega^{-1}(\Omega(t_*))$. При $\varepsilon_* = \infty$ из (3) следует формула Хоффа [6]. Если $\varepsilon_* = 0$, материал является идеально хрупким и разрушение наступает при $t_* = 0$. В общем случае при $0 < \varepsilon_* < \infty$ имеем $0 < \Omega(t_*) < 1/(n\sigma_0^n)$. В условиях ползучести прочность испытуемого образца характеризуется напряжением, которое при данных температурах и длительности работы приводит к разрушению. Это напряжение обычно называется пределом длительной прочности. В большей части экспериментальных исследований по ползучести и длительной прочности лабораторные установки приспособлены для испытаний металлических образцов на растяжение. Как правило, теоретические расчеты и экспериментальные данные для деформаций ползучести и времени разрушения рассматриваются в логарифмических координатах:

$$\ln \Omega(t_*) + n \ln \sigma_0 = -\ln n + \ln [1 - \exp(-n\varepsilon_*)]. \quad (4)$$

Если по оси абсцисс откладывать время разрушения $\ln t_*$, а по оси ординат напряжение $\ln \sigma_0$, то решение, полученное в [6], удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов. Однако опытные точки всегда находятся ниже расчетных, полученных по этому решению. Данный экспериментальный результат легко объясняется тем, что у реальных материалов разрушение наступает при конечных деформациях. Решение, описанное в [6], имеет ограниченное применение, так как оно не отражает хрупкое разрушение, происходящее при малых деформациях. Лабораторные испытания твердых тел проводят на образцах различных размеров и конфигураций. Если получаемые результаты предназначены для расчетных целей и сравнения теории с экспериментальными данными, то опыты ставят так, чтобы напряженное состояние было близким к одномерному. Другими словами, желательны испытания на одноосное растяжение, одноосное сжатие, кручение или поперечный изгиб. Однако напряженное состояние при поперечном изгибе является неоднородным. Получить надежные результаты экспериментов при растяжении образцов горных пород длительно действующими нагрузками не представляется возможным. Это связано с малой сопротивляемостью горных пород растягивающим усилиям, а также с трудностью разделения головок образца под захваты испытательной машины. Следовательно, для горных пород наиболее приемлемыми испытаниями в условиях ползучести и при длительном действии нагрузки на образец являются опыты на одноосное сжатие. Чтобы организовать одномерное напряженное состояние одноосного сжатия, необходимо либо избавиться от трения на торцах, либо сжимать цилиндрические керны между двумя конусами, образующие которых будут составлять с плоскостью давления угол, равный углу трения.

Далее рассмотрим разрушение цилиндрического образца при сжатии в условиях длительного действия осевой нагрузки при отсутствии трения на торцах. Рассматриваемый случай не укладывается в схему [6], однако задача определения времени разрушения образца при сжатии может быть решена с позиции предлагаемого подхода. Рассмотрим разрушение образца горной породы при одноосном сжатии. Обозначим $\varepsilon = -\varepsilon_x^c$, $\sigma = -\sigma_x$ — деформация ползучести и напряжение при сжатии соответственно. Рассмотрим степенной закон ползучести и большие деформации сжатия без учета упругих составляющих:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\Omega}{dt} \sigma^n, \quad \varepsilon = -\varepsilon_x^c = -\ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0}{l}, \quad \frac{l_0}{l} = \exp(\varepsilon). \quad (5)$$

Применяя очевидные преобразования для одноосного сжатия образца, получим формулы

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0} \frac{F_0}{F} = \sigma_0 \frac{F_0}{F} = \sigma_0 \frac{l}{l_0} = \frac{\sigma_0}{\exp(\varepsilon)}.$$

Подставляя полученное выражение в степенной закон ползучести (5), имеем:

$$d\Omega(t) = \frac{d \exp(n\varepsilon)}{n\sigma_0^n}, \quad \Omega(t_*) = \frac{\exp(n\varepsilon_*) - 1}{n\sigma_0^n}. \quad (6)$$

Функция $\Omega(t)$ должна находиться по кривым ползучести и должна быть известна из результатов предварительно проведенных экспериментов. Предельное значение деформации ползучести при одноосном сжатии ε_* также должно определяться из опытов. Подставляя в (6) ε_* , находим $\Omega(t_*)$ и время разрушения $t_* = \Omega^{-1}(\Omega(t_*))$. Так же можно определить время разрушения при кручении. Известно, что предельная необратимая деформация большинства материалов, в том числе и для горных пород, при сжатии больше, чем при растяжении. Аналогичная зависимость характерна для соответствующих этим напряженным состояниям времен разрушения. Следовательно, можно утверждать, что в предлагаемом подходе при кратковременном и длительном действии нагрузок разрушение твердых тел происходит, когда максимальный необратимый сдвиг достигает предельного значения, характерного для данного материала.

В настоящее время для металлов и горных пород наиболее распространенными в теориях ползучести являются степенной закон и гипотеза подобия:

$$\varepsilon_c = \Omega(t)\sigma^n, \quad \dot{\varepsilon}_c = B\sigma^n = \frac{d\Omega}{dt} \sigma^n \quad (7)$$

здесь n — показатель ползучести; B — коэффициент ползучести. Для металлов $n = 1 - 12$ [1], для горных пород $n = 1 - 9$, для соляных пород $n = 1 - 5$, конкретные значения n для различных горных пород приводятся в [11]. Степенной закон применительно к горным породам в зарубежной литературе называют законом Глена. В обзоре, сделанном Картером [11], сообщалось о многочисленных экспериментах по определению постоянных в (7). Обнаружено, что значения n , которые представляют наибольший интерес, для дунита составляют около 2–3, для сухого кварцита 6.5, для мрамора 8.3, для доломита 9.1. Подобные эмпирические зависимости логарифма истинной деформации от логарифма истинного напряжения характерны для некоторых пластичных металлов при кратковременном нагружении. В этом случае n — показатель деформационного упрочнения, B — коэффициент прочности.

СДВИГОВАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И УЧЕТ ДИЛАТАНСИИ

Основные свойства горных пород при неупругом деформировании — разная сопротивляемость при растяжении и сжатии и дилатансия, т. е. увеличение объема материала при сдвиге. Первое свойство можно описать, если предположить, что в условиях ползучести на предельное значение максимального касательного напряжения T_{13} влияет нормальное напряжение на этой же площадке. Такое предположение приводит к критерию длительной прочности Кулона–Мора. Применение этого критерия для анализа разрушения различных материалов при кратковременном и длительном действии различных постоянных нагрузок рассматривается в [12–15]. Для предельного состояния неполной ползучести критерий Кулона–Мора имеет вид

$$\sigma_e = \frac{T_{13}}{\cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2 \operatorname{tg} \varphi} = C(t_*), \quad (8)$$

T_{13} — максимальное касательное напряжение; φ — угол внутреннего трения; $C(t_*)$ — параметр длительной прочности, зависящий от времени разрушения t_* . Обозначим σ_e левую часть критерия (8), тогда для зависимостей с нулевым и ненулевым значениями σ_0 имеем

$$C(t_*) = \frac{A}{t_*^n}, \quad C(t_*) = \sigma_0 + \frac{A}{t_*^n}, \quad (9)$$

где A , n и σ_0 — параметры прочности горных пород, вычисляемые по результатам опытов. Для каждого из пределов длительной прочности (9) можно определить

$$t_* = A^n \sigma_e^{-n}, \quad t_* = A^n (\sigma_e - \sigma_0)^{-n}, \quad (10)$$

σ_0 — ненулевой предел ползучести, ограничивающий снизу диапазон напряжений, при котором развивается процесс ползучести [16]. В пространстве главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ критерий прочности (8) представляет собой шестигранную пирамиду с вершиной на гидростатической оси. Этот критерий определяет две предельные плоскости, которые отклоняются от плоскостей действия T_{13} на угол $\varphi/2$ в направлении оси наибольшего сжатия. Предельные плоскости образуют с направлением σ_1 углы $\pi/4 \pm \varphi/2$. Так как предельные плоскости не ортогональны, то можно применить механизм двойного скольжения с дилатансией, сумма которых равна γ_c . Проецируя эти сдвиги на главные оси напряжений для состояния неполной ползучести, когда $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, получим:

$$\dot{\epsilon}_1 = \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha \sin \varphi + \cos \varphi}{2} \right) \dot{\gamma}_c, \quad \dot{\epsilon}_3 = \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha \sin \varphi + \cos \varphi}{2} \right) \dot{\gamma}_c. \quad (11)$$

В рассматриваемом предельном состоянии рост деформаций ползучести обусловлен сдвигом γ_c , а поврежденность горной породы связана с α . В общем случае коэффициент дилатансии зависит как от уровня достигнутых напряжений, так и от необратимого сдвига γ_c , т. е. $\alpha = \alpha(\sigma, \gamma_c)$. Наибольшее значение поврежденности материала достигается при разрушении, когда $\gamma_c = \gamma_*$, а $t = t_*$. Применяя определяющие соотношения (11) и уравнение неразрывности, запишем:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho v_{i,i} = -\rho \dot{\epsilon}_{ii} = -\rho \alpha \frac{d\gamma_c}{dt} \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = -\alpha d\gamma_c.$$

Если предположить, что $\alpha = \text{const}$, то это дифференциальное уравнение можно проинтегрировать. Учитывая, что при $t = 0$, $\gamma_c = 0$, $\rho = \rho_0$, определим зависимость изменения плотности от γ_c . При разрушении сдвиг $\gamma_c = \gamma_*$ и плотность $\rho = \rho_*$ одновременно достигают предельного критического значения:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\exp(\alpha \gamma_c)}, \quad \rho_* = \frac{\rho_0}{\exp(\alpha \gamma_*)}.$$

При использовании критерия (8) для решения задач с неоднородным распределением напряжений уравнения ползучести следует применять в виде:

$$\dot{\gamma}_c = \Omega(t) \sigma_e^n, \quad \dot{\gamma}_c = B \sigma_e^n = \frac{d\Omega}{dt} \sigma_e^n. \quad (12)$$

Остановимся на описании методики определения прочностных характеристик горных пород в условиях ползучести с применением степенного закона, критериев длительной прочности $\gamma_c = \gamma_*$ и Кулона–Мора (8), (9). В общем случае $\Omega(t)$ и $B(t)$ должны определяться по кривым ползучести на основе экспериментальных данных на одноосное сжатие. В каждом опыте цилиндрический образец нагружается осевой силой так, чтобы выдержать однородное состояние одноосного сжатия с постоянным напряжением σ . Во время действия нагрузки постоянно осуществляется измерение осевой деформации ε и определяется деформация ползучести ε_c . Далее по формулам (8), (11)

вычисляются σ_e и γ_c . Одновременно испытания проводятся на нескольких образцах (5–7 шт.) у которых в процессе испытания напряжение постоянное, но от образца к образцу уменьшается с равномерным шагом, начиная с максимального значения, равного пределу прочности, до минимального, равного пределу длительной прочности (ползучести σ_0). Для каждого опыта, в котором σ_e остается постоянным, строится зависимость: $\gamma_c = \gamma_c(t)$ — кривая ползучести. По экспериментальным кривым ползучести осреднением находятся показатель ползучести n , коэффициент ползучести B и функция $\Omega(t)$. Процесс ползучести можно разделить на три стадии [1, 2]. В первой стадии скорость деформации ползучести убывает, во второй — ползучесть протекает с минимальной постоянной во времени скоростью, в третьей — скорость деформации возрастает, пока не наступает разрушение образца. На втором участке при установившейся ползучести $B = \text{const}$. В логарифмических координатах из (12) имеем

$$\ln \dot{\gamma}_c = n \ln \sigma_e + \ln B. \quad (13)$$

Если в (13) ось абсцисс связывать с напряжением, а ось ординат со скоростью ползучести, в значительном интервале напряжений экспериментальные точки в логарифмических координатах группируются около некоторой прямой линии. Тангенс угла наклона этой прямой к оси напряжений будет совпадать с показателем ползучести n , а при известных скорости и напряжении коэффициент ползучести B определяется из (13).

При определении времени разрушения, когда развиты деформации ползучести, можно пренебречь деформацией, накапливаемой в первом периоде, тогда $\gamma_c = Bt\sigma_e^n$. Для грунтов деформационный критерий длительной прочности предложен С. С. Вяловым и М. Н. Гольдштейном, согласно которому разрушение породы наступает, если накопление деформации ползучести достигает предельного значения $\gamma_c(t) = \gamma_*$ [16]. Учитывая (12), можно определить A в критерии длительной прочности (8), (9), (10) при известной предельной деформации ползучести γ_* :

$$\gamma_c = \dot{\gamma}_c e, B\sigma_e^n t_* = \gamma_*, t_* = \frac{\gamma_*}{B} \sigma_e^{-n}, A = \left(\frac{\gamma_*}{B} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ЗАДАЧАХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Рассмотрим задачу о наступлении предельного состояния при вдавливании жесткого штампа с плоским основанием в породный массив постоянной нагрузкой P . Деформируемый породный массив ограничен горизонтальной плоскостью и занимает нижнюю часть полупространства. Предполагается, что трение по поверхности контакта штампа с полупространством горного массива отсутствует. При длительном действии постоянной вертикальной нагрузки P в условиях ползучести горных пород под штампом в определенный момент времени $t = t_*$ возникает предельное состояние и предельная зона, в которой выполняется критерий длительной прочности (8). Считается, что в предельной зоне породный массив разрушается одномоментно, и задача состоит в определении этого времени разрушения t_* .

Выберем систему координат: ось x имеет горизонтальное направление, z — вертикальное, ось y перпендикулярна плоскости (x, z) . Будем также считать, что для главных осей напряжений 1, 2 и 3 выполняется неравенство $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Следовательно, главные оси 1 и 3 находятся в плоскости (x, z) , а ось y совпадает с направлением действия σ_2 . В таком случае в направлении y реализуется плоская деформация и состояние неполной ползучести, для которого применяется критерий длительной прочности (8) и два уравнения равновесия. Для данного предельного состояния разрушения в условиях ползучести задача является статически определимой, а система дифференциальных уравнений имеет гиперболический тип [12–15].

На рис. 1. приводится поле линий скольжения, отвечающее обобщению решения Прандтля для горных пород в состоянии идеальной ползучести [12]. Пусть $a = AB$ — ширина плоского штампа, P — постоянная нагрузка, действующая на штамп. Предположим, что в предельном состоянии в условиях ползучести распределение давления под штампом равномерное, тогда на AB имеем $\sigma_z = -q = -P/a$. Применяя соотношение на характеристической линии и граничные условия на AB и BE , получим

$$q = C(t_*) \operatorname{ctg} \varphi \left(\operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right).$$

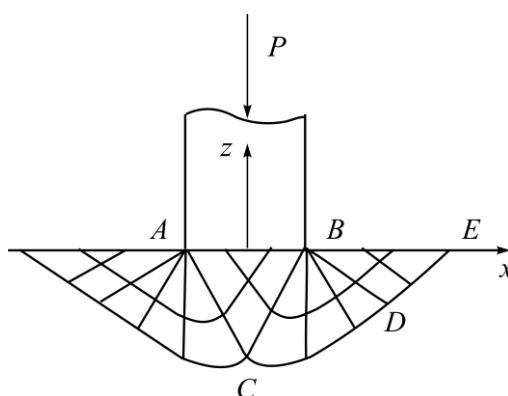


Рис. 1. Обобщение решения задачи Прандтля для горных пород в условиях ползучести

При известной из критерия длительной прочности зависимости $C = C(t_*)$ найдем время разрушения t_* . Учитывая (9), запишем:

$$t_* = \frac{A^n}{\left[\frac{q \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1} - \sigma_0 \right]^n}.$$

Обратимся к потере устойчивости природных склонов, откосов и бортов карьеров в условиях ползучести под действием различных постоянных нагрузок. Сначала рассмотрим задачу о возникновении предельного состояния борта карьера, который нагружен в точке A постоянной силой F (рис. 2).

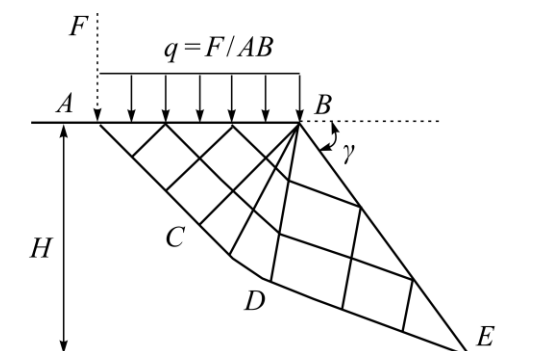


Рис. 2. Потеря устойчивости борта карьера при действии постоянной нагрузки в условиях ползучести

Так как в предельном состоянии результирующая сил сопротивления сдвигу равна по приложенной силе, то будем считать, что время разрушения t_* определяется лишь главным вектором силы F . В этом случае можно перейти к решению эквивалентной задачи с равномерно распределенной нагрузкой $q = F / AB$, как указано на рис. 2, и с тем же значением главного вектора. Применяя метод характеристик, имеем:

$$q = C(t_*) \operatorname{ctg} \varphi \left(\operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) e^{(\pi - 2\gamma) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right). \quad (14)$$

Учитывая (9) и (10), из (14) определяем:

$$t_* = \frac{A^n}{\left[\frac{q \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) e^{(\pi - 2\gamma) \operatorname{tg} \varphi} - 1} - \sigma_0 \right]^n}.$$

Предположим, что разрушение борта карьера, откоса или природного склона произойдет под действием силы тяжести грунта или породного массива (рис. 3). Напряженное состояние до образования борта карьера было гидростатическое $\sigma_x = \sigma_z = -\rho g h$, где ρg — удельный вес грунта; h — расстояние от рассматриваемой точки до свободной поверхности AB . Образование откоса $B \rightarrow gh$ до 0. Треугольная эпюра для этой нагрузки изображена на рис. 3 штриховой линией. Заменим эту нагрузку равномерно распределенной с $q = gh / 2$ и тем же значением результирующей силы.

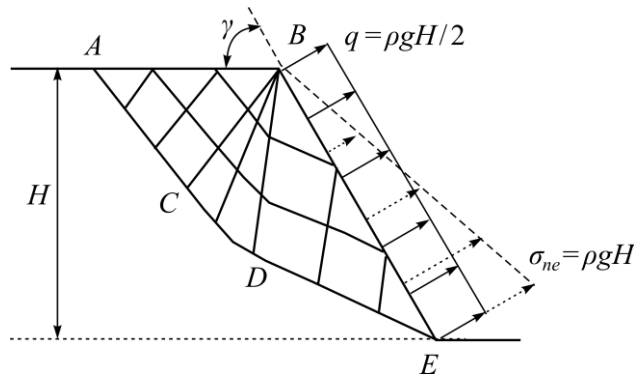


Рис. 3. Разрушение природного склона или борта карьера под действием силы тяжести породного массива в условиях ползучести

Предположим, что напряженное состояние в грунте до образования откоса или борта карьера гидростатическое $\sigma_x = \sigma_z = -\rho g h$, где ρg — удельный вес грунта; h — расстояние от рассматриваемой точки до свободной поверхности AB . Образование откоса BE можно смоделировать как увеличение нормального напряжения на линии BE от значения $-\rho g h$ до 0. Треугольная эпюра для этой нагрузки изображена на рис. 3 штриховой линией. Заменим эту нагрузку равномерно распределенной с $q = \rho g h / 2$ и тем же значением результирующей силы. Применяя метод характеристик и учитывая (9) и (10), получим:

$$q = C(t_*) \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{-(\pi - 2\gamma) \operatorname{tg} \varphi} \right);$$

$$t_* = \frac{A^n}{\left[\frac{q \operatorname{ctg} \varphi}{1 - \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{-(\pi - 2\gamma) \operatorname{tg} \varphi}} - \sigma_0 \right]^n}.$$

ВЫВОДЫ

При длительном действии нагрузок вязкопластическое разрушение в твердых телах следует связывать с потерей сдвиговой прочности и достижением максимальным необратимым сдвигом конечного предельного значения, характерного для данного материала.

Процесс вязко-хрупкого и хрупкого разрушения следует рассматривать как процесс возникновения и развития трещин в условиях ползучести, поэтому в качестве параметра поврежденности материала в рассматриваемой сдвиговой модели принята дилатансия, которая учитывает образование трещин и пор с ростом необратимых деформаций и уменьшение плотности горных пород.

Получены обобщения решений прикладных задач для идеально пластического материала применительно к разрушению горных пород в условиях ползучести, определены времена разрушения и напряжения в предельных зонах. Рассмотрены следующие задачи: вдавливание жесткого штампа с плоским основанием в породный массив, разрушение природных склонов и бортов карьеров под действием различных постоянных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Л. М. Теория ползучести. — М.: Физматлит, 1960. — 455 с.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
3. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. — Алма-Ата: Наука, 1964. — 175 с.
4. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Институт гидродинамики АН СССР, 1986. — 96 с.
5. Локощенко А. М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. — М.: МГИУ, 2007. — 264 с.
6. Hoff N. The necking and the rupture of rods subjected to constant tensile loads, J. Appl. Mech., 1953, Vol. 20, No. 1.
7. Johnson A. E. Complex-stress creep of metals, Metallurgical Rev., 1960, Vol. 5, No. 20. — P. 447–506.
8. Сдобырев В. П. Длительная прочность сплава ЭИ437Б при сложном напряженном состоянии // Изв. АН СССР. ОТН. — 1958. — № 4. — С. 92–97.
9. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. — М.: Наука, 1978. — 432 с.
10. Зарецкий Ю. К., Городецкий С. Э. Дилатансия мерзлого грунта и построение деформационной теории ползучести // Гидротехническое строительство. — 1975. — № 2. — С. 15–18.
11. Шейдеггер А. Основы геодинамики. — М.: Недра, 1987. — 384 с.
12. Коврижных А. М. Вариант теории пластической деформации горных пород // ФТПРПИ. — 1983. — № 1. — С. 3–8.

13. **Коврижных А. М., Никитенко А. Ф., Барышников В. Д., Манаков А. В.** Длительная прочность металлов и уравнения ползучести, основанные на критерии Кулона–Мора // ПМТФ. — 2007. — № 6. — С. 115–123.
14. **Коврижных А. М.** Длительная прочность металлов и предельное состояние в условиях ползучести // Изв. РАН. МТТ. — 2009. — № 2. — С. 121–129.
15. **Коврижных А. М.** О единой сдвиговой модели в теориях пластичности, ползучести и разрушения горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 2. — С. 82–90.
16. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. В примерах и задачах. — М.: Недра, 1989. — 270 с.
17. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1974. — № 3. — С. 130–133.
18. **Цытович Н. А.** Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1979. — 272 с.
19. **Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г.** Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб: Наука, 2001. — 343 с.
20. **Mogi K.** Experimental rock mechanics, Geomechanics Research Series 3. — London, 2007. — 361 p.
21. **Терентьев В. Ф.** Усталость металлических материалов. — М.: Наука, 2002. — 248 с.
22. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. — М.: Ленанд, 2021. — 504 с.

Поступила в редакцию 18/X 2023

После доработки 03/XI 2023

Принята к публикации 16/XI 2023