Л.К.ГОРШКОВ, С.В.НАУМОВ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ КАК КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ГЛИН

Устойчивость обнаженного пласта глин при проходке транспортных или канализационных тоннелей определяет эффективность и безопасность горных работ, так как от времени устойчивого состояния обнаженного забоя глинистого пласта зависит регламентируемое отставание постоянной крепи выработки, способ механизации выемочных работ, время уборки горной массы и т.п. Кроме того, глинистые толщи в последние годы широко используются как хранилища различных отходов (например, радиоактивных), поэтому время устойчивого состояния обнажения и здесь играет существенную роль.

При этом следует заметить, что на пласт глины действует постоянная система нагрузок: от одноосного сжатия при больших обнажениях и малых глубинах до значительного трехстороннего сжатия (одного вертикального и двух боковых). Обозначим вертикальное давление через σ_1, а боковые через σ_2 и σ_3, в большинстве случаев, особенно на больших глубинах, $\sigma_2 = \sigma_3$. Представим глинистый массив как набор отдельных слоев и рассмотрим устойчивость одного слоя единичной ширины при воздействии на него вертикального и горизонтального (бокового) давления (рис.1). При этом предполагается упругое защемление одного из концов рассматриваемого пласта, что отвечает модели процесса, особенно для сухих пластов (при нулевой их влажности).

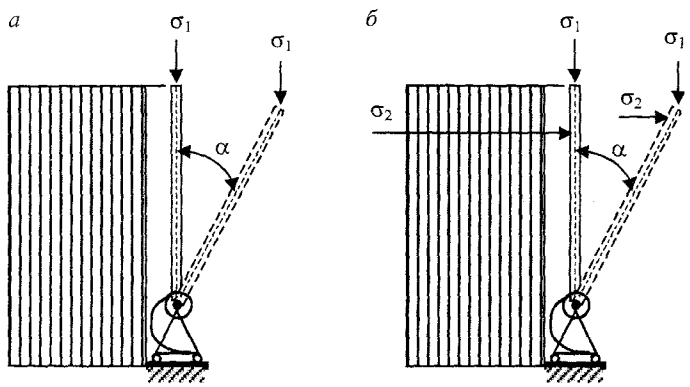


Рис.1. Расчетная схема нагружения некоторого слоя глины единичной ширины: при отсутствии (*а*) и наличии (*б*) бокового обжатия ($\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$)

В упругой заделке возникает реактивный момент $C\alpha$, где C – объемная жесткость упругой заделки, равная отношению реактивного момента к объему рассматриваемого тела. При нагружении пластов вертикальным давлением σ_1 (рис.1, *а*), условно постоянным по модулю и направлению, слой будет отклоняться от вертикали и испытывать продольные ε_1 и поперечные ε_2 деформации. Если значение σ_1 будет достаточно велико, то система не сможет сохранить равновесие и потеряет устойчивое состояние. В качестве начала отсчета примем удельную потенциальную энергию системы в неотклоненном состоянии пласта, т.е. при $\alpha = 0$. При отклонении и деформации слоя совершается работа, равная половине произведения давления σ_1 на вертикальную деформацию ε_1, т.е. $\Delta U = 0{,}5\sigma_1\varepsilon_1(1-\cos\alpha)$, поэтому общая удельная потенциальная энергия системы

$$U = \frac{C\alpha^2}{2} - \frac{\sigma_1\varepsilon_1}{2}(1-\cos\alpha). \qquad (1)$$

Условие равновесия при этом имеет вид

$$\frac{dU}{d\alpha} = C\alpha - \frac{\sigma_1\varepsilon_1}{2}\sin\alpha = 0. \qquad (2)$$

При увеличении σ_1 точки пласта, отвечающие положению равновесия, смещаются и состояние равновесия из устойчивого переходит в неустойчивое; в этом случае должно существовать и промежуточное (критическое) состояние равновесия, когда не только первая производная $dU/d\alpha$, но и вторая $d^2U/d\alpha^2$ переходят через ноль. Этому состоянию отвечают уравнение (2) и выражение

$$\frac{d^2U}{d\alpha^2} = C - \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1\cos\alpha = 0. \qquad (3)$$

Начальное положение равновесия $\alpha = 0$ выполняется при таком значении σ_1, когда выражение (3) будет иметь вид

$$C = 0{,}5\sigma_1\varepsilon_1. \qquad (4)$$

Из формулы (4) следует, что объемная жесткость вертикального слоя глины – величина непостоянная, зависящая от состояния вертикального давления σ_1 и продольной деформации слоя. Величины σ_1 и ε_1 определяются значением бокового обжатия: $\sigma_1 = f(\sigma_2)$. Тогда с изменением σ_1, в зависимости от изменения σ_2, меняется и объемная жесткость C, что подтверждено специальными экспериментами (табл. 1). Среднее взвешенное значение $C = 1{,}85$ МПа (для $\sigma_2 \geq 10$ МПа).

Переходя к учету бокового обжатия (рис.1, *б*), следует сказать, что такая задача является неоднородной задачей устойчивости, так как в этом случае начальное, недеформированное состояние не обязательно является положением равновесия.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки изменения объемной жесткости вертикального слоя сухой глины при изменении вертикального и бокового давления

σ_2, МПа	σ_1, МПа	ε_1, 10^{-3}	C, МПа	σ_2, МПа	σ_1, МПа	ε_1, 10^{-3}	C, МПа
0	11,0	2,79	0,016	10	33,18	14,19	0,235
1	23,94	7,14	0,086	25	59,84	30,60	1,0
2,5	20,77	7,44	0,077	50	73,04	76,12	2,78
5	28,35	8,50	0,121	75	108,68	62,56	3,40

Если считать σ_1 и $\sigma_2 = \sigma_3$ постоянными во времени и по направлению, то уравнение равновесия

$$C\alpha - 0{,}5\sigma_1\varepsilon_1\sin\alpha = \sigma_2\varepsilon_2\cos\alpha. \qquad (5)$$

В выражении (5) значение $\sigma_2\,\varepsilon_2$ соответствует сумме $0{,}5\sigma_2\varepsilon_2 + 0{,}5\sigma_3\varepsilon_3$, так как $\sigma_2 = \sigma_3$.

Если принять значение α достаточно малым (близким к нулю), то $\sin\alpha = \alpha$, $\cos\alpha = 1$, тогда

$$C\alpha - 0{,}5\sigma_1\varepsilon_1\alpha = \sigma_2\varepsilon_2. \qquad (6)$$

Интегрируя выражение (6), получим уравнение связи для удельной потенциальной энергии и бокового обжатия (см. рис.1, *б*):

$$0{,}5C\alpha^2 - 0{,}25\sigma_1\varepsilon_1\alpha^2 - \sigma_2\varepsilon_2\alpha = 0$$

или

$$\alpha^2(0{,}5C - 0{,}25\sigma_1\varepsilon_1) - \sigma_2\varepsilon_2\alpha = 0. \qquad (7)$$

Часть удельной потенциальной энергии со значением α во второй степени, следуя терминологии А.Р.Ржаницына [1], назовем параметрической нагрузкой (давлением). Другая часть нагрузки (давления), производящая работу на перемещениях, где α в первой степени, есть ак-

тивная нагрузка, определяющая энергоемкость деформирования твердого тела, в нашем случае образца сухой глины. Решив уравнение (6) относительно α, найдем напряжение, соответствующее активной нагрузке:

$$\alpha = 2\sigma_2\varepsilon_2 /(2C - \sigma_1\varepsilon_1). \quad (8)$$

Значение условного перемещения α, пропорциональное энергоемкости деформирования, представляет все же величину условную, так как реально пласт глины не система отдельных полосок, а массив, для деформирования которого требуются определенные затраты энергии. Представляется целесообразным найти соотношения условной величины α и реальной энергоемкости.

С этой целью была проведена серия экспериментов по деформированию образцов сухой глины котлинского горизонта (зеленовато-серого цвета, слоистой, аргиллитоподобной) с прочностью на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 2 \div 8$ МПа.

Следует заметить, что эти глины являются вмещающими для туннелей Санкт-Петербургского метрополитена и, согласно ВСН 190–78, Т.3, считаются хотя и неустойчивыми, но не требующими специальных способов обеспечения Правил безопасности при проходке тоннелей. Сухие образцы этих глин с вертикальной слоистостью (вдоль направления σ_1) подвергались всестороннему сжатию по методике А.Н.Ставрогина и Б.Г.Тарасова [2] до предела прочности и в запредельном состоянии при следующих значениях бокового обжатия: ($\sigma_2 = \sigma_3$): 0; 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 75 МПа.

Испытания сопровождались записью продольной и поперечной деформаций образцов. Специальная программа для ЭВМ позволяла при этом определять текущие значения модуля упругости в продольном и поперечном направлениях, объемный модуль упругости, коэффициент хрупкости, максимальные касательные напряжения и энергоемкость как до предела прочности, так и в запредельном состоянии. В первом приближении, согласно схеме (рис.1, *б*), $\operatorname{tg}\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$. Так как σ_2 меняется в широких пределах, меняется и σ_1, с тем чтобы преодолеть боковое обжатие, но темпы их изменения разные, поэтому $\alpha = \operatorname{arctg}\sigma_2 / \sigma_1$ есть величина непостоянная, что следует и из выражения (7). Значения α из выражения (7) соответствуют реальной ситуации нагружения, а значения $\alpha = \operatorname{arctg}\sigma_2 / \sigma_1$ можно считать максимально возможными, их превышение влечет за собой потерю устойчивости вертикального обнажения слоя глины.

В ходе проведенных экспериментов найдено соотношение между предельным значением условного угла отклонения $\alpha = \operatorname{arctg}\sigma_2 / \sigma_1$ и энергоемкостью $Э = Э^{до} + Э^{за}$ (табл.2), где $Э^{до}$ – энергоемкость деформирования глины до предела прочности, Дж/м^3; $Э^{за}$ – то же в запредельном состоянии, Дж/м^3.

Таблица 2

Соотношение между $\alpha_{кр}$ и предельно допустимой энергоемкостью деформирования вертикальных слоев сухих глин

σ_2, МПа	σ_1, МПа	tg α	$\alpha_{кр}$, рад	$Э^{до}$, 10^5 Дж/м^3	$Э^{за}$, 10^5 Дж/м^3	$\Sigma Э$, 10^5 Дж/м^3
0	11	0	0	0,19	0,02	0,21
1	23,94	0,0407	0,041	1,13	0,34	1,47
2,5	20,77	0,1203	0,120	1,11	0,10	1,21
5	28,35	0,1764	0,175	1,62	0,35	1,97
10	33,18	0,3014	0,293	3,40	0,63	4,03
25	59,84	0,4178	0,396	13,85	5,77	19,62
50	73,04	0,6845	0,601	39,85	–	39,85
75	108,68	0,6901	0,602	46,96	–	46,96

Для определения значений энергоемкости как функции бокового обжатия рассчитаны значения угла отклонения α по формуле (7), где объемная жесткость упругой заделки принята равной средневзвешенному значению $C = 1{,}85$ МПа, рассчитанному для $\sigma_2 \geq 10$ МПа (см. табл.1). Рассчитанные значения углов отклонений соотнесены, согласно данным табл.2, с текущими и предельно возможными значениями энергоемкости (табл.3).

Таблица 3

Расчет текущих значений энергоемкости деформирования образцов сухой глины с вертикальной слоистостью в сравнении с предельной энергоемкостью

σ_2, МПа	ε_2, 10^{-3}	σ_1, МПа	ε_1, 10^{-3}	$\alpha_т$, рад	$\alpha_{кр}$, рад	Э$_т$, 10^5 Дж/м^3	ΣЭ, 10^5 Дж/м^3	Примечания
0	4,23	11	2,79	0	0	–	0,21	
1	2,44	23,94	7,14	0,0014	0,041	0,05	1,47	
2,5	6,02	20,77	7,44	0,009	0,120	0,09	1,21	
5	2,73	28,35	8,50	0,008	0,175	0,01	1,97	
10	6,11	33,18	14,19	0,037	0,293	0,50	4,03	
25	13,54	59,84	30,60	0,358	0,396	17,80	19,62	
50	37,79	73,04	76,12	–	0,601	–	39,85	Потеря устойчивости
75	29,67	108,68	62,56	–	0,602	–	46,96	– " –

По данным табл.3 построена зависимость энергоемкости от величины бокового обжатия σ_2 (рис.2), откуда следует, что для испытуемых глин устойчивое равновесное состояние сохраняется до величины бокового обжатия $\sigma_2 = 28{,}5$ МПа, дальнейший рост бокового давления вызывает потерю устойчивости.

Аналогичную методику оценки устойчивости (потери равновесия) можно применить и для горизонтально-слоистых глин, отличия будут только в абсолютных значениях расчетных и экспериментально определяемых параметров, так как для обнаженного пласта вертикальное давление будет играть роль бокового обжатия, а одно из значений бокового давления будет определять продольную деформацию слоев в горизонтальном направлении.

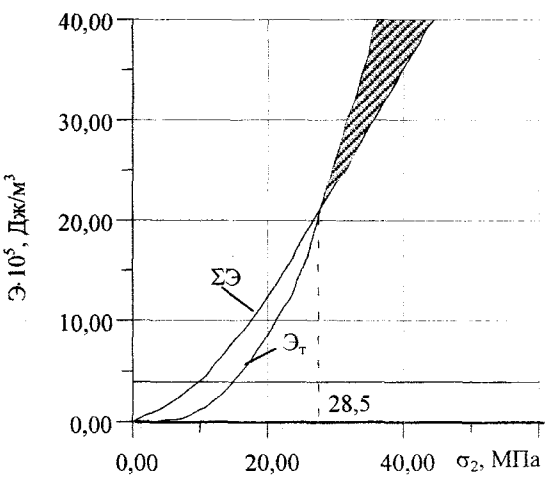


Рис.2. Зависимость энергоемкости от бокового обжатия

Для косослоистых глин значительную роль будет играть касательное напряжение на наклонных площадках (рис.3). Из графика следует, что при косой слоистости (40-45°) касательное напряжение имеет наименьшее значение. Это значит, что косослоистые напластования будут наименее устойчивыми при открытых обнажениях. На том же графике видно, что при вертикальной слоистости устойчивость также невысока: 40 % от устойчивости при горизонтальном залегании.

Устойчивость обнажений слоев глин в значительной мере зависит от влажности слагающих разрез глин (рис.4).

При увеличении влажности от 0 до 10 % (естественная влажность) прочность глин на одноосное сжатие снижается в зависимости от типа глин. Например, у глин, отобранных в районе строительства станции метро «Пл. Мира II», прочность снизилась от 3,3 до 1,4 МПа (в 2,35 раза), а у глин, отобранных в районе станции метро «Старая Деревня», от 2 до 0,6 МПа (в 3,3 раза), что нельзя не учитывать при проектировании и проходке тоннелей метрополитена.

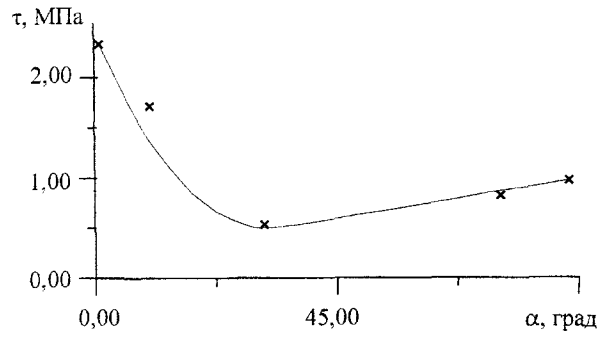


Рис.3. Зависимость прочности глин от ориентации слоистости при одноосном сжатии

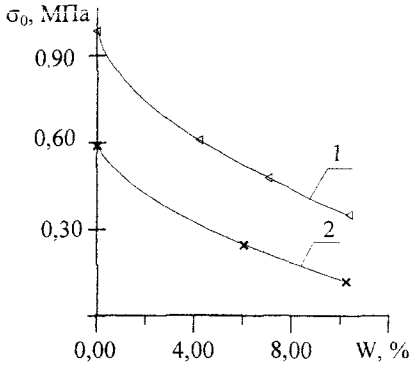


Рис.4. Зависимость σ_0 от влажности при одноосном сжатии глин перпендикулярно слоистости на станциях метрополитена
1 – «Пл. Мира II»; 2 – «Старая Деревня»

Выводы

1. Объемная жесткость упругой заделки вертикальных слоев массива глин при всестороннем сжатии с переменными значениями давлений есть функция вертикальной составляющей давления, в свою очередь зависящей от бокового обжатия.

2. Энергоемкость деформирования вертикальных слоев сухих глин удовлетворительно соотносится со значениями условного угла отклонения отдельных слоев и может служить критерием краткосрочной устойчивости обнажений глинистых пластов; при этом текущее значение энергоемкости не должно превышать предельно допустимого значения, которое соответствует предельному углу отклонения, определенному соотношением бокового и вертикального давления.

3. Наибольшую опасность при открытых обнажениях составляют косослоистые глины (40-45°), наиболее устойчивыми являются обнажения горизонтальной слоистости.

4. В зависимости от типа глин влажность снижает прочностные характеристики слоев в 2,3–3,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978.

2. *Ставрогин А.Н.* Баланс энергии при хрупком разрушении горных пород / А.Н.Ставрогин, Б.Г.Тарасов // ФТПРПИ. 1985. № 1.

3. *Ставрогин А.Н.* Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня // М.: Недра, 1992.