УДК 622.831.312; 833: 624.19

Е.Э.Мартиросянц
Санкт-Петербургский горный ин-т, Россия

ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГЛИН В ЗАБОЯХ ТОННЕЛЕЙ

Анализируется зависимость устойчивости протерозойских глин в забоях строящихся тоннелей от различных влияющих факторов: глубины заложения, мощности глин от кровли выработки до четвертичных отложений, прочностных свойств пород и диаметра тоннелей. Предложены показатели устойчивости породных обнажений при различных схемах деформирования пород. Показатели устойчивости рекомендуются маркшейдерским службам для использования в прогнозах осадок поверхности под влиянием горно-строительных работ.

A dependence of Proterozoic clays in the faces of tunnels under construction from different factors affecting them, i.e. the depth of the seam, thickness of clays up to the Quaternary sediments, prognostic properties of rocks and tunnels diameters is analysed. Indexes of exposed rocks stability in different schemes of rock deformation are offered. The mentioned indexes can be recommended for underground surveying when forecasting surface deformation in underground construction works.

Устойчивость пород в забоях при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена определяется геологической службой института «Ленметрогипротранс» по ведомственной инструкции ВСН-190-78 [1]. Согласно табл.3 ВСН-190-78, по устойчивости породы делятся на четыре категории: устойчивые, средней устойчивости, слабой устойчивости, совершенно неустойчивые. В качестве количественной характеристики используется коэффициент крепости пород по М.М.Протодьяконову. Указаны качественные признаки: плотность, трещиноватость, консистенция глинистых грунтов (твердые, полутвердые, мягкие, тугопластичные, текучие). Нормы ВСН-190-78 разработаны для строительства тоннелей и метрополитенов в широком спектре горно-геологических условий и, естественно, не могут учитывать особенности состояния протерозойских глин при проходке выработок в Санкт-Петербурге. В частности, в этих условиях коэффициент крепости не может служить определяющим признаком, иначе протерозойские глины, прочность которых при сжатии не превышает 8 МПа, должны быть отнесены к категории совершенно неустойчивых.

Ниже предлагаются показатели устойчивости породных обнажений в протерозойских глинах, представляющие собой соотношения сил сопротивления глин к разрушающим напряжениям, выведенные применительно к типовым схемам деформирования глин в призабойной зоне. Рассмотрены три типичных случая деформаций пород, сопровождающиеся отслоениями породы из груди забоя за временной крепью или ее разрушением:

1) локальные вывалы породы на обнажениях в результате раздавливания глин сжимающими напряжениями;

2) отслоения за временной крепью груди забоя, ограниченные его площадью или захватывающие кровлю за контуром тоннеля в результате смещения (сдвига, выдавливания) породы в сторону обнаженной поверхности;

3) продавливание потолочины протерозойских глин в забой весом толщи четвертичных отложений.

Последний случай, по существу, является неблагоприятным вариантом второй схемы, который может реализоваться при малой толщине потолочины от кровли тоннеля до контакта глин с четвертичными отложениями.

В первом случае за критерий устойчивости пород в геомеханике обычно принимают отношение действующих в массиве напряжений к соответствующим показателям прочности. В нашем случае показатель можно представить в виде

$$П = \frac{\gamma H K_1 K_2 K_3}{\sigma_{ст}\,\eta_1\,\eta_2\,\eta_3\,\eta_4}, \qquad (1)$$

где γH – геостатические напряжения в массиве; K_1-K_3 – коэффициенты, учитывающие концентрацию напряжений от проходки тоннеля (K_1), от влияния других выработок (K_2), отставания постоянной крепи и тампонажных работ от забоя (K_3); $\sigma_{ст}$ – прочность глин при сжатии, полученная на образцах или непосредственным опробованием глин в забое; η_1-η_4 – коэффициенты, учитывающие зависимость прочности глин от трещиноватости (η_1), наличия в забое прочных или слабых прослойков (η_2), продолжительности отстоя забоя при его остановке (η_3), типа и жесткости временного крепления «лба» забоя (η_4) [2].

Коэффициент концентрации напряжений в приконтурной зоне массива для нелинейно деформируемой среды

$$K_1 = 2/(1+m)$$

где m – параметр, зависящий от реологических свойств породы, для упругой среды $m = 0$, для твердых и полутвердых глин $m = 0{,}8$, для пластичных глин $m = 0{,}6$.

Протерозойские глины относятся к твердым и полутвердым разновидностям, соответственно $m = 0{,}8$; $K_1 = 1{,}33$.

Коэффициент K_2 определяется с учетом размеров зоны влияния выработок $L_в \le (3 \div 5)D$, где D – наружный диаметр выработки:

Ширина целика	$4D$	$3D$	$2D$	D
K_2	1,0	1,03	1,08	1,2

Коэффициент K_3 зависит от отставания постоянной обделки и тампонажных работ от забоя l_0. Его значения определены по схеме пригрузки забоя весом пород в своде обрушения:

l_0, м	≤ 1	2	3
K_3	1	1,15	1,3

Коэффициенты η_1, η_2 определяются конкретными горно-геологическими условиями. Для глин $\eta_1 = 0{,}2 \div 0{,}8$; $\eta_2 = 0{,}8 \div 1{,}2$. С учетом данных ВНИМИ о соотношении прочности глин при длительных и кратковременных испытаниях коэффициент $\eta_3 = 0{,}65 \div 1{,}0$.

Отпор временной крепи не может существенно повлиять на деформационные процессы в призабойной зоне, поэтому целесообразно принимать коэффициент $\eta_4 = 1$ при традиционной конструкции крепи «лба» забоя, а для крепи с усилением укосинами или анкерами увеличивать до 1,2.

Второй случай представляется наиболее актуальным для практики строительства тоннелей. Показатель устойчивости получен из соотношения сил сопротивления к сдвигающим усилиям в плоском сечении [3]. Предполагается, что отслоение глин от массива произойдет в результате сдвига по плоскости *АБ*, наклоненной к горизонту под углом θ (рис.1). Размеры вывала, выраженные через диаметр тоннеля *D*, составляют по высоте *mD*, вдоль оси выработки *nD* (здесь *m* и *n* – неизвестные численные коэффициенты).

Разделим вывал вертикальными сечениями через 1 м на *n* отсеков. По условию Мора – Кулона сила трения по плоскости сдвига составляет $W_i \cos\theta \operatorname{tg}\varphi$, сцепление $C/\cos\theta$, сдвигающая сила $W_i \sin\theta$. Показатель устойчивости получим суммированием усилий по *n* отсекам:

$$F_{уст} = \frac{nDW_i \cos\theta \operatorname{tg}\varphi + nDC/\cos\theta + qD\cos\theta}{nDW_i \sin\theta}, \quad (2)$$

где W_i – вес отсека; φ, *C* – угол внутреннего трения и сцепление глин по плоскости сдвига; *q* – отпор временной крепи «лба» забоя.

Расчеты показали, что влияние отпора временной крепи на соотношение сил в плоскости сдвига невелико. Последнее слагаемое при отпоре крепи 3 т/м^2 не превышает 5 % от суммы сил трения и сцепления. В этой связи выражение (1) можно представить в упрощенном виде, положив $q = 0$ и $W_i = \gamma\, mD$:

$$F_{уст} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\theta} + \frac{C}{\gamma mD \sin\theta \cos\theta}. \quad (3)$$

Для практических целей, с некоторым запасом, рекомендуется выражение

$$F_{уст} = \operatorname{tg}\varphi + \frac{C}{\gamma D}, \quad (4)$$

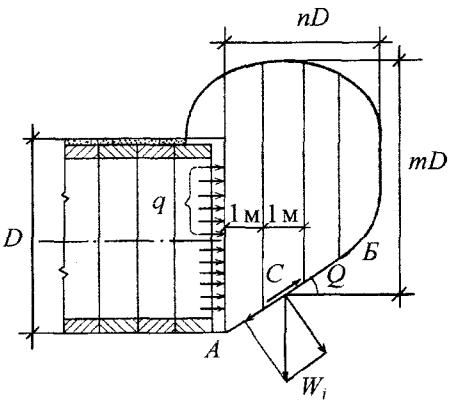


Рис.1. Силы сопротивления и сдвига в глинах призабойной зоны тоннеля

что соответствует сдвигу по плоскости при θ = 45 % и образованию вывала высотой от кровли тоннеля 0,4*D* (*m* = 1,4).

О зависимости $F_{уст} = f(C, \varphi)$ можно судить по табл.1, где приведены показатели устойчивости при переменных характеристиках прочности глин объемным весом 0,021 МН/м^3.

Таблица 1

Показатель устойчивости глин в забое тоннеля диаметром 8,5 м

C, МПа	φ, град.	$C/\gamma D$	$F_{уст}$
0,01	12	0,056	0,3
0,05	16	0,28	0,57
0,1	18	0,56	0,87
0,25	20	1,4	1,74
1,25	24	7,0	7,4

Показательно, что устойчивость забоя зависит, в основном, от сцепления. Влияние угла внутреннего трения сказывается только в весьма слабых ($C < 0{,}2$ МПа) глинах.

Зависимость $F_{уст} = f(D)$ носит линейный характер (рис.2).

Третий случай вероятен на участках, где мощность залегающей в кровле тоннелей протерозойской глины относительно невелика. Тоннель диаметром *D* проходит на глубине $H_1 + H_2$ от поверхно-

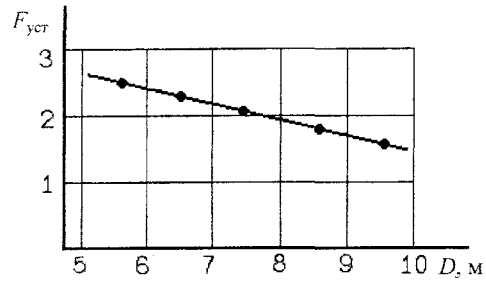


Рис.2. Зависимость показателя устойчивости от диаметра тоннеля

сти (H_1 – мощность наносов, H_2 – толщина потолочины глин от кровли тоннеля до контакта с четвертичными отложениями). Давление наносов вместе с собственным весом глины способно продавить породу в забой. При этом столб глин цилиндрической формы будет удерживаться силами сцепления C_1 и трения T_1 по боковым поверхностям и аналогичными силами C_2 и T_2 по плоскости сдвига. Соответственно показатель устойчивости

$$F'_{уст} = \frac{T_1 + T_2 + C_1 + C_2}{W \sin\theta}, \qquad (5)$$

где W – вес сползающего столба породы.

Опуская промежуточные преобразования, приведем конечное выражение показателя:

$$F'_{уст} = \left[\frac{2H_2(2H_1 + H_2)\beta}{D\left(H_1 + H_2 + \frac{D}{2}\right)\sin\theta} + \cos\theta \right] \times$$

$$\times \operatorname{tg}\varphi + \frac{(4H_2\cos\theta + D)}{\gamma D\left(H_1 + H_2 + \frac{D}{2}\right)\sin\theta\cos\theta}, \qquad (6)$$

где $\beta = \operatorname{tg}^2(45 - D/2)$ – коэффициент бокового распора для глин.

Первое слагаемое отражает влияние на показатель устойчивости сил внутреннего трения, второе – сцепления.

Из структуры формулы (6) следует, что в число влияющих на показатель устойчивости факторов входят геометрические параметры H_1, H_2, D, показатели физико-механических свойств пород γ, C, φ, β, а также угол наклона плоскости сдвига θ.

Для выявления зависимости показателя устойчивости от мощности глин в кровле тоннеля сделаны расчеты $F_{уст}$ для тоннеля диаметром 8,5 м в проходке при неизменных параметрах $\varphi = 24°$; $\beta = 0{,}42$; $\gamma = 0{,}02$ МН/м^3, $\theta = 35°$, переменных соотношениях H_1 и H_2 и различных значениях удельного сцепления C (табл.2).

Таблица 2

Зависимость показателя устойчивости от мощности глин в кровле тоннеля

H_1, м	H_2, м	C, МПа				
		0,05	0,1	0,2	0,4	0,8
55	5	1,29	1,53	2,02	3,0	4,93
50	10	2,07	2,47	3,28	4,89	8,11
45	15	2,8	3,36	4,5	6,74	11,2
40	20	3,47	4,2	5,6	8,5	14,3

Полученные численные значения показателя устойчивости подтверждают выводы специалистов Метростроя о том, что мощность слоя глин в кровле тоннеля является значимым для устойчивости пород в забое фактором. Особенно неблагоприятно сочетание малой, до 10 м, мощности потолочины и низкой прочности глин (сцепление до 0,2 МПа).

С уменьшением диаметра выработки показатель устойчивости увеличивается. В глинах ($C = 0{,}1$ МПа, $\varphi = 16°$, $\beta = 0{,}57$) мощностью в кровле 10 м показатель устойчивости в тоннеле $D = 5{,}5$ м в 1,6 раза больше, чем в тех же условиях в тоннеле $D = 9{,}5$ м.

При выборе прочностных характеристик глин необходимо учитывать по-

вышенную влажность подстилающих четвертичные отложения слоев глин и соответствующее снижение удельного сцепления и угла внутреннего трения. В этой связи растет значение исследований зависимости прочности глин от их влажности и методик опробования глин непосредственно в забоях.

Выводы

1. Предложенные показатели устойчивости в целом правильно отражают зависимости устойчивости породных обнажений от основных влияющих факторов: прочностных характеристик пород (сцепления, угла внутреннего трения), площади поперечного сечения тоннеля и мощности толщи протерозойских глин от свода тоннеля до четвертичных отложений.

2. При мощности глин в кровле более 10 м оценку устойчивости следует выполнять по схеме возможного вывалообразования (показатели П и $F_{уст}$), менее 10 м – по схеме вывалообразования и схеме продавливания глин весом толщи четвертичных отложений ($F_{уст}$ и $F'_{уст}$).

3. Необходимым условием оценки устойчивости пород в забоях по показателям $F_{уст}$ и $F'_{уст}$ является экспериментальное определение прочностных характеристик глин.

4. Отпор временной крепи из трубчатых расстрелов с затяжкой груди забоя не способен предотвратить переход глин призабойной зоны в предельное состояние. Временная крепь предупреждает вывалы породы, отслоившейся от массива, и способствует локализации деформаций глин в призабойной зоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства горных, железнодорожных и автодорожных тоннелей. ВСН-190-78 / Минтранстрой СССР. М., 1978. 41 с.

2. *Огородников Ю.Н.* Оценка устойчивости породных обнажений при строительстве подземных сооружений в протерозойских глинах // Тр. российско-китайского симпозиума «Строительство шахт и городских подземных сооружений» / Кузбасский государственный технический университет. Кемерово, 2000. 188 с.

3. *Фисенко Г.Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.