

**РОЗЕНВАССЕР
ГРИГОРІЙ РУВИНОВИЧ**

Кандидат технічних наук, дійсний член Міжнародного товариства по механіці ґрунтів і геотехнічній інженерії, дійсний член Академії будівництва України, завідувач науково-дослідницьким відділом будівельних і підземних споруд в складних геотехнічних умовах ДП «Донецький ПромстройНИИпроект».

Основні напрями діяльності – механіка підземних споруд, будівельні конструкції будівель і споруд в складних геотехнічних умовах.

Автор більше 150 наукових праць.

E-mail: gir.dptm@mail.ru

**ТОКОВЕНКО
ВЛАДИМИР НИКОЛАЄВИЧ**

Член-кореспондент Академії будівництва України, головний спеціаліст науково-дослідницького відділу будівельних і підземних споруд в складних геотехнічних умовах ДП «Донецький ПромстройНИИпроект».

Основні напрями діяльності – механіка ґрунтів, будівельні конструкції, розрахунки залізобетонних і металевих конструкцій.

Автор більше 25 наукових праць.

E-mail: gir.dptm@mail.ru

УДК 624.195

СТРОИТЕЛЬСТВО ДОНЕЦКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЯХ

Ключевые слова: подрабатываемые территории, тектонические нарушения, метрополитен, строительные меры защиты

Розглянута актуальна проблематика будівництва Донецького метрополітену, що стосується геомеханіки, механіки підземних споруд і будівельних конструкцій. Сформульовані передумови до розробки будівельних заходів захисту перегінних тунелів від впливу нерівномірних деформацій ґрунтових масивів. Запропоновані й реалізовані технічні розв'язки по захисту від впливу гірських розробок і тектонічних порушень, що забезпечують при мінімальних витратах експлуатаційну придатність споруди.

Розглянута актуальна проблематика будівництва Донецького метрополітену, що стосується геомеханіки, механіки підземних споруд і будівельних конструкцій. Сформульовані передумови до розробки будівельних заходів захисту перегінних тунелів від впливу нерівномірних деформацій ґрунтових масивів. Запропоновані й реалізовані технічні розв'язки по захисту від впливу гірських розробок і тектонічних порушень, що забезпечують при мінімальних витратах експлуатаційну придатність споруди.

The actual problems of the Donetsk Underground Railway construction related to geomechanics, mechanics of the underground constructions and building structures have been examined. Preconditions for developing the structural measures for running tunnels protection against uneven deformations of the soil body have been set up. The technical solutions for protection against the undermining and tectonic faults to improve the construction serviceability with minimum costs have been offered and implemented..

1 ВВЕДЕНИЕ

Трассы Донецкого метрополитена глубиной заложения до 50м находятся в непосредственной близости от выходов под наносы и на земную поверхность смесителей разрывных тектонических нарушений или пересекают их. Наличие этих нарушений, а также прохождение трассы на подработанных ранее территориях, возможность проведения новых горных работ при частичной отработке целиков может привести без соответствующих мер защиты к недопустимым деформациям объектов метрополитена.

2 ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

С геомеханической точки зрения строительство метрополитена в Донецке осложняется следующими факторами: массив горных пород и земная поверхность многократно подработаны в разное время на различных глубинах подземными горными выработками; возможно частичное воздействие горных работ на сооружения метрополитена в перспективе; по трассам метрополитена имеется 17 геологических нарушений (рис. 1), которые сами по себе являются осложняющим фактором, а при подработке нарушений этот фактор становится преобладающим; массовое закрытие нерентабельных шахт с частичным или полным затоплением активизирует процессы сдвижения массива горных пород, а, следовательно, и земной поверхности.

Горный массив в зонах выветривания пород карбона структурно ослаблен, а его прочностные свойства резко снижены. Наиболее ослабленными являются аргилиты (глинистые сланцы) и алевролиты (песчаные сланцы), в меньшей степени – песчаники. Для пород этой зоны характерна повышенная естественная трещиноватость и пористость по сравнению с глубокими горизонтами. В результате многократных подработок трещиноватость еще более увеличилась. Поэтому массив горных пород можно рассматривать как дискретную среду, состоящую из отдельных блоков различных размеров.

Еще более сложное строение имеет массив в зонах тектонических нарушений. Преобладающей формой этих нарушений в Донбассе являются надвиги, которые всегда определенным образом связаны с отдельными складками или целыми складчатыми зонами и представляют в совокупности однотипную деформацию – сокращение размеров участка в горизонтальном направлении. Так, по результатам геодезических измерений в районе Французского надвига отмечено сжатие земной поверхности со скоростью в среднем до 20мм/год, стабильные оседания – до 3мм/год [1].

Многолетними наблюдениями установлено, что при подработке нарушений горными работами может фиксироваться аномальное распределение сдвижений и деформаций по сравнению с ненарушенным массивом [2]. Как правило, основное внимание уделяется центральной части мульды сдвижения. Однако, учитывая, что сооружения метрополитена охраняются с помощью целиков угля, рассмотрены также случаи, когда выход нарушения располагается в краевой части мульды сдвижения.

При расположении выхода нару-

шения над целиками, уступы не образуются, а фиксируются сглаженные знакопеременные деформации. Кроме того, имеются случаи проявления нарушения, когда выход располагался за пределами мульды, построенной по граничным углам.

Обращает на себя внимание тот факт, что в пределах всей полумульды преобладают горизонтальные деформации сжатия с двумя четкими участками концентрации сжатий на границах тектонической зоны как с породами висячего, так и лежащего крыла нарушения.

Можно констатировать следующее: при ведении горных работ за пределами охранных целиков на участке выхода нарушения возможны сдвигения даже за пределами стандартной мульды; сдвигения и деформации имеют четко выраженный неравномерный характер; процесс характеризуется постепенным возрастанием параметров.

В горном массиве тектонические нарушения и геодинамические структуры проявляются резким изменением свойств горных пород, их напряженного состояния и гидрогеологических условий, что обуславливает над такими зонами аномалии различных физических полей.

На рис. 2 приведены результаты исследований активности геодинамических зон (ГДЗ) в районе Французского и Коксового надвигов.

Осложняющими факторами являются также: выхода угольных пластов под наносы; горные работы прежних периодов на глубине около (свыше) 80м; неравномерность подработки участка поверхности по группе пластов различной мощности в разные периоды времени; возможность активизации процессов сдвижения породного массива при ликвидации шахт способом затопления.

Совокупность перечисленных факторов свидетельствует о неблагоприятной геодинамической ситуации на участках пересечения перегонными тоннелями тектонических нарушений.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБДЕЛКИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ С ГРУНТОВЫМ МАССИВОМ

На моделях (метод эквивалентных материалов) грунтовых массивов с жесткой и гибкой (модель перегонного тоннеля Донецкого метрополитена) обделками проведены исследования развития лобовых нагрузок при воздействии горизонтальных деформаций сжатия (рис. 3).

Установлена (рисунок 4) зона доверительных результатов ($l_c = 5,5R$), а также активные зоны сжатия: для жесткой

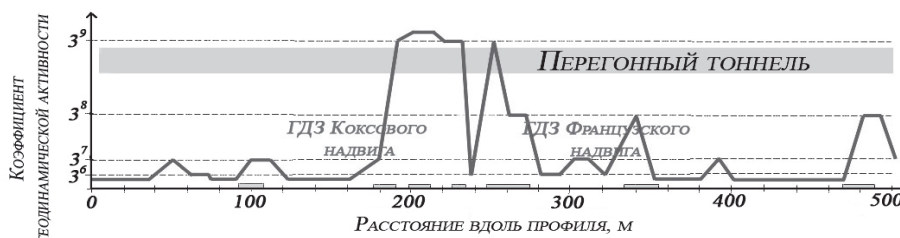


Рис. 2 График активности геодинамических зон

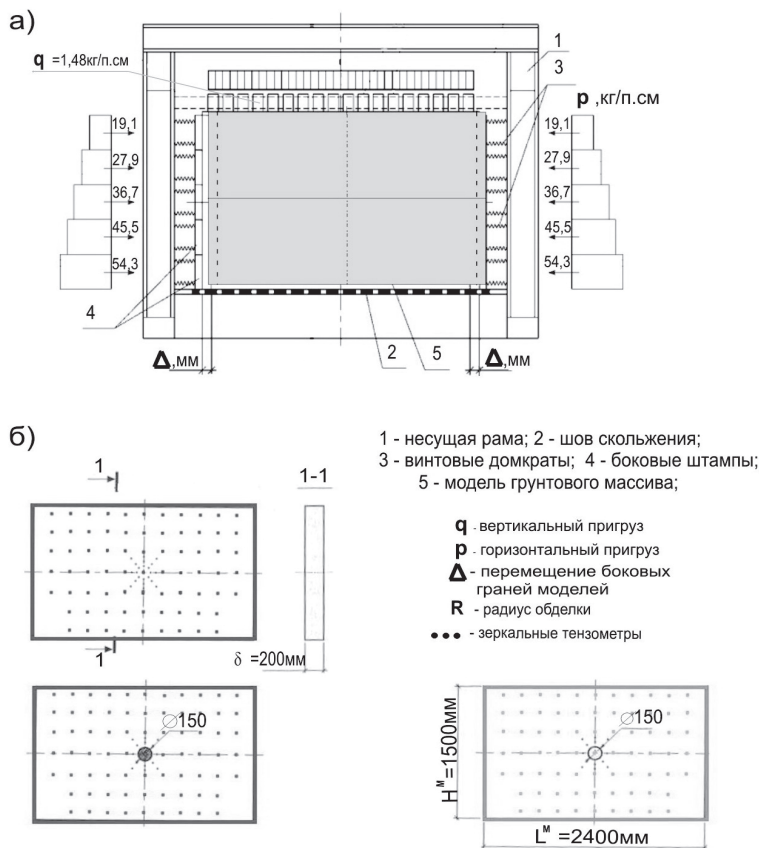


Рис. 3 Стенд, нагрузки (а), грунтовые модели (б)

обделки ($l_{ar}=2,3R$) и для гибкой обделки ($l_{af}=4,5R$).

Развитие исходных деформаций в грунте $\epsilon=-2,7mm/m$ на уровне горизонтального диаметра выработки показано на рис. 5. В массиве без выработки деформации распространяются по его длине равномерно; в массиве с бесконечно жесткой обделкой в непосредственной близости от нее деформации резко возрастают $\epsilon>-10mm/m$; в массиве с обделкой конечной жесткости в ее окрестности деформации понижаются до $\epsilon=+1,5mm/m$, а с приближением к контактной поверхности происходит изменение знака деформаций до $\epsilon=-0,8mm/m$. Снижение деформационного воздействия на обделку по сравнению с исходным составляет 70%.

4 ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

На основе описанных выше закономерностей деформирования и геологических особенностей массива горных пород были сформулированы предпосылки к разработке строительных мер защиты перегонных тоннелей от влияния неравномерных деформаций грунтового массива:

- расчетные параметры деформаций земной поверхности составляют: вне зон тектонических нарушений – $i_p=\pm 2,5mm/m$; $\epsilon_p=\pm 2mm/m$; $R_p=\pm 15km$; в зонах тектонических нарушений – $i_p=\pm 4mm/m$; $\epsilon_p=\pm 3mm/m$; $R_p=\pm 3,1km$;
- наиболее опасными с точки зрения концентрации деформаций на границах нарушений являются участки «входа» и «выхода»;
- в зонах нарушений коэффициент крепости пород и коэффициент упругого отпора в 3-4 раза, а модуль

- упругости – в 3-5 раз меньше, чем вне этих зон;
- для крупных тектонических нарушений характерным является блочное строение, поэтому, кроме распределенной нагрузки, необходимо учитывать сосредоточенные нагрузки – от вероятного вывалообразования отдельных породных блоков с контура выработки;
- обжатая (прижатая) в породе обделка является более эффективной с точки зрения недопущения смещений блоков, непосредственно прилегающих к контуру выработки, и провокации смещений других блоков. По этой же причине применение буровзрывного способа проходки крайне опасно;
- блочное строение тектонических зон может вызвать деформирование вышележащей толщи, сложенной перемежающимися зонами растяжения-сжатия. Поэтому обделка тоннеля и деформационные швы должны конструктивно воспринимать знакопеременные вертикальные и горизонтальные деформации как в поперечном, так и в продольном направлении. В связи с тем, что размеры отдельно смещающихся породных блоков неизвестны и могут изменяться в широком диапазоне, длина жестких отсеков должна приниматься минимально возможной;
- блочность строения, а также низкая надежность тектонических зон вызывает необходимость опережающего контрольного бурения, а также обеспечения повышенных требований к технике безопасности, так как в этих зонах возможны вывалы блоков горных пород.

5 СТРОИТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ

Реализация ряда новых предпосылок при проектировании Донецкого метрополитена позволила частично компенсировать геотехнические осложнения территории строительства.

В частности, по национальным нормам предусматриваются «веерные» расхождения блочных колец при искривлении основания (рисунок 6, а). С учетом изложенного анализа геомеханических процессов в преимущественно сжатом грунтовом массиве и имея в виду стесненные условия работы блочной обделки, наиболее вероятным характером ее деформирования является плоскопараллельное перемещение блочных колец с раскрытием или закрытием кольцевых швов (рис. 6,б).

Приведенные предпосылки нашли отражение в рабочем проекте и строительстве перегонных тоннелей.

На всей трассе, вне зон и в зонах тектонических нарушений, применена железобетонная блочная обделка $\varnothing 5,65m$ с цилиндрическими стыками между блоками. При этом перегонный тоннель в продольном направлении выполняется из податливых отсеков L_0 и деформационных вставок L_d между ними (рис. 7).

В податливых отсеках соединительно-деформационные швы между блочными кольцами обеспечивают их одностороннюю работу – только на горизонтальные деформации растяжения, при которой длина жесткого отсека становится равной длине одного блочного кольца l_0 и, сле-

довательно, требуемая компенсационная способность шва даже при максимальных значениях $\epsilon = \pm 12 \cdot 10^{-3}$ составляет не более $[K] = \pm 12 \text{ мм}$. При действии горизонтальных деформаций сжатия блочные кольца, перемещаясь в продольном направлении, выбирают монтажные зазоры a_m , смыкаются и организуют жесткий отсек длиной равной сумме длин блочных колец на участке податливого отсека. При этом длина организовавшегося жесткого отсека при действии усилий сжатия ($\sim 7200 \text{ кН/пог.м}$) ограничивается только расчетным сопротивлением бетона на смятие $R_b \cdot l_{oc}$ торцевых поверхностей блочных колец.

Дальнейшие перемещения отсека L_0 сбрасываются в деформационную вставку, в которой между блочными кольцами предусмотрены деформационные швы, работающие в двух направлениях – на сжатие-растяжение. В этом случае длина жесткого отсека в деформационной вставке в любом из двух направлений работы равна длине одного блочного кольца l_0 , а зазоры a_d между ними подбираются таким образом, чтобы их сумма в деформационной вставке была не меньше величины деформационного зазора Δ между расчетными отсеками L_{01} . Это дает возможность, исходя из наличия упругих герметичных уплотнителей с заданной компенсационной способностью, принять любое количество блочных колец в деформационной вставке.

Таким образом, податливый отсек L_0 работает по двум схемам: как единый жесткий отсек длиной L_0 при действии $-\epsilon$, и отдельными жесткими отсеками каждый длиной одного блочного кольца l_0 при действии $+\epsilon$. А деформационная вставка L_d работает отдельными жесткими отсеками l_0 как при действии $+\epsilon$, так и $-\epsilon$.

Технический результат нового конструктивного решения состоит в том, что компенсация значительных деформаций грунтового массива, действующих на тоннель, происходит при минимальных зазорах между блочными кольцами в деформационной вставке, заполненных упругими герметичными материалами массового изготовления.

Длины податливого отсека и деформационных вставок устанавливались из нижеследующих соотношений.

Длина податливого отсека:

$$\frac{L_0}{\delta} \leq \frac{\eta \cdot R_{b,loc}}{\tau} \quad (1)$$

где $L_0 = \sum l_0$; δ – высота сечения блока; η – коэффициент компенсации горизонтальных деформаций сжатия, $\eta = k \cdot \epsilon / \epsilon_m$; k – параметр контактной поверхности обделки и грунта, $2 \leq k \leq 4$; ϵ_m – относительное значение монтажных зазоров между блочными кольцами на участке податливого отсека, $\epsilon_m = a_m / l_0$; a_m – монтажный зазор между блочными кольцами в податливом отсеке; τ – предельное сдвигающее напряжение в грунте от горизонтальных деформаций сжатия.

Длина деформационной вставки:

$$\frac{L_d}{L_0} \geq \frac{\epsilon}{\epsilon_d - \epsilon} \quad (2)$$

где ϵ_d – относительное значение деформационных зазоров между блочными кольцами на участке деформационной

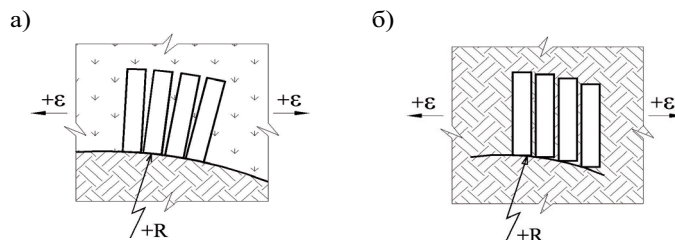


Рис. 6 Схемы деформирования блочного тоннеля в подрабатываемом массиве: а – по национальным нормам; б – по результатам исследований.

вставки, $\epsilon_d = a_d / l_0$; a_d – деформационный зазор между блочными кольцами в деформационной вставке, $\sum a_d \geq \Delta$; $\Delta = \epsilon \cdot L_{01}$; $L_{01} = L_0 + L_d$.

Предложенное техническое решение [3] приводит к равноценной компенсационной способности сооружения при зазорах между блочными кольцами в деформационной вставке $a_d = 20 \text{ мм}$.

Для I линии метрополитена принято: вне зон тектонических нарушений соотношение длин податливых отсеков и деформационных вставок – 10:1, соответственно $L_0 = 60 \text{ м}$ и $L_d = 6 \text{ м}$; в зонах тектонических нарушений указанное соотношение – 1:1, соответственно $L_0 = L_d = 6 \text{ м}$. При этом зазоры между блочными кольцами в деформационных вставках составляют $a_d = 5-7 \text{ мм}$, в податливых отсеках – $a_m = 1-3 \text{ мм}$.

Как видно, предложенное техническое решение перегонного тоннеля адекватно отражает концепцию его защиты от влияния горных разработок и тектонических нарушений и обеспечивает качественно новые условия его работы, позволяющие при минимальных затратах повысить эксплуатационную надежность сооружения.

Достоверность распространенных представлений о взаимодействии неравномерно деформируемого грунтового массива с обделкой является недостаточной. Опыты [4] показали, что в виду проявления арочного эффекта в гибкой обделке исходные величины горизонтальных деформаций сжатия по мере приближения к выработке уменьшаются до нуля, меняют знак, а в зоне контакта с обделкой – формируют лобовое давление при деформациях сжатия в 2-3 раза ниже исходных.

На подрабатываемых территориях особое значение приобретает своевременный ввод обделки в работу, поскольку в блочном массиве даже минимальное отставание возведения обделки от образования выработки может спровоцировать контурное вывалообразование. Здесь нужны с одной стороны – бесащадочные технологии, исключающие эти явления [5], и с другой – достоверные расчетные модели, отражающие указанные особенности нарушенной среды и нелинейные эффекты в работе среды, материалов и конструкции в целом.

В настоящее время ведется проходка перегонных тоннелей первого пускового участка Пролетарско-Киевской линии от станции «Пролетарская» до станции «Политехнический институт». На этом участке – 6 станций и 10 км двухпутных перегонных тоннелей; электродепо на станции «Пролетарская»; водопропускное сооружение из сводчатых замкнутых железобетонных блоков; инженерный корпус и др.

Успешно пройден два надвига – «Заперевальный» и «Мушкетерский», что подтверждает эффективность и конкурентоспособность строительных мер защиты.

