

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328 82 25*

Н.А.БЕЛЯКОВ, *аспирант, nike-bel@yandex.ru*

Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.G.PROTOSENYA, *Dr tech. sci., professor, (812) 328 82 25*

N.A.BELYAKOV, *post-graduate student, nike-bel@yandex.ru*

Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛАБОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИГРУЗА ЗАБОЯ

Приводится анализ упрочняющего эффекта в призабойной зоне при проведении тоннелей с применением пригруза забоя тоннелепроходческими механизированными комплексами.

Методом конечных элементов получен ряд графических зависимостей, отражающих процессы развития смещений; предложена оптимальная величина пригруза забоя по заданным предельно допустимым осадкам земной поверхности.

Установлено влияние основных прочностных показателей теории прочности Кулона – Мора на устойчивость забоя тоннеля и необходимую величину пригруза.

Ключевые слова: тоннель, пригруз, смещение, деформация, напряжения, коэффициент концентрации, осадки поверхности.

THE DETERMINATION OF THE VOLUME STRESS-STRAIN CONDITIONS OF THE SOIL MASSIF IN THE FACE AREA OF THE TUNNEL IN CONDITIONS OF DRAFTING WITH USING OF CONTLEDGE OF THE FACE

In this learned article the analysis of reinforcing effect, which appears during the process of the drilling of tunnels with using of contledge of the face which applied in tunnel boring machines, is adduced.

By applying of the finite-elements method the family of graphical relations, which reflects the processes of the development of displacements, is approached. For the reason of analysis of these relations the optimal value of contledge of the face if maximum permissible displacements of the earth surface are known have been suggested.

The influence of the main strength characteristics of Coulomb – Mohr's theory of strength on stability of the face of the tunnel and the necessary value of contledge of the tunnel's face are defined.

Key words: tunnel, contledge, displacement, strain, stress, concentration factor, earth's surface yielding.

При строительстве подземных сооружений в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях, особенно в условиях плотной городской застройки, в настоящее время, как правило, используют-

ся тоннелепроходческие механизированные комплексы (ТПМК) с различными видами пригруза забоя [1].

Очевидным преимуществом такой технологии строительства является возмож-

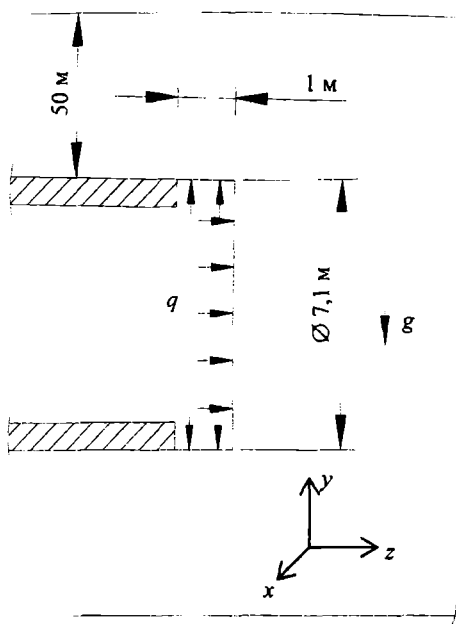


Рис.1. Принципиальная расчетная схема

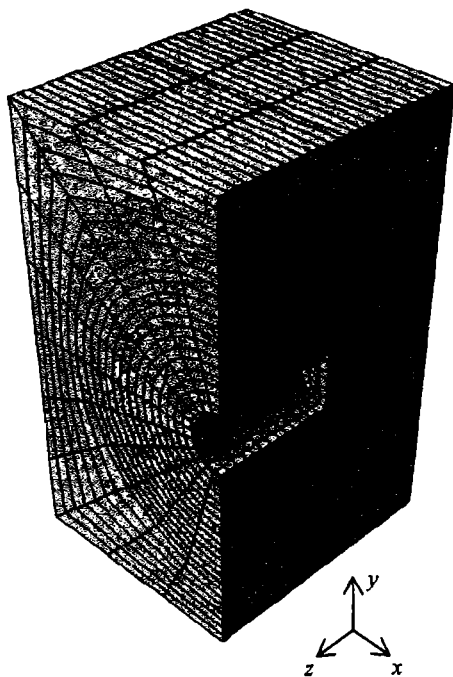


Рис.2. Фрагмент конечно-элементной модели

ность избежать потери устойчивости забоя в процессе проходки тоннеля за счет его постоянного подпора силой пригруза, которая может создаваться различными способами (грунтопригруз, гидропригруз, пенопригруз и другие). При правильном выборе усилия пригруза можно добиться полной компенса-

ции смещений плоскости забоя внутрь выработки, что позволит избежать осадок на поверхности, т.е. создать практически безосадочную технологию строительства.

Кроме этого, проходка с использованием ТПМК с пригрузом забоя позволяет получить высокие скорости проходки при строительстве в сложных горно-геологических условиях за счет высокой степени механизации труда проходчиков.

Некоторые вопросы пространственного моделирования геомеханических процессов при строительстве тоннелей с применением ТПМК рассмотрены в работах [2, 3].

Для исследования влияния усилия пригруза забоя на напряженно-деформированное состояние массива была составлена математическая модель участка породного массива, вмещающего тупиковую выработку кругового очертания, закрепленную бетонной крепью, а в головной части – оболочкой ТПМК. Отставание крепи от забоя составило 1 м. Незакрепленный участок выработки и плоскость забоя оставались либо свободно деформируемыми, либо подвергались пригрузу с различным усилием.

Моделирование пригруза выполнялось равномерно распределенной нагрузкой, приложенной непосредственно к плоскости забоя и к стенкам тоннеля на участке между этой плоскостью и оболочкой ТПМК.

Принципиальная расчетная схема представлена на рис.1. Согласно расчетной схеме в модели создавалось начальное неравнокомпонентное поле напряжений под действием собственного веса породного массива. При моделировании диаметр выработки тоннеля в проходке принимался равным 7,1 м, а глубина его заложения – 50 м. Выбор именно таких параметров проходки обусловлен тем, что результаты моделирования в последующем сравниваются с натурными данными, полученными при проведении перегонных тоннелей метрополитена Санкт-Петербурга на участке между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества».

Анализируемая модель представлена на рис.2. Размеры модели в направлении осей x и y превышают размеры выработки в семь раз. Задача решалась в объемной постанов-

ке. Боковые и торцевые грани модели закреплены от перемещений в направлении осей x и z соответственно. Нижняя грань модели закреплена от перемещений в направлении оси y . Верхняя грань модели оставлена свободно деформируемой. Решение задачи выполнялось в упруго-пластической постановке. Для учета влияния прочностных и деформационных свойств пород, слагающих массив, и параметров пригруза забоя при проведении выработки на смещения массива решение задачи выполнялось в два этапа:

- на первом этапе вычислялось начальное поле напряжений и исторических смещений в нетронutom массиве под действием собственного веса при граничных условиях, приведенных выше;

- на втором этапе модель массива с напряженно-деформированным состоянием, определенным на первом этапе, ослаблялась выработкой кругового очертания. В результате для определения смещений, образующихся в результате проведения тоннеля, из поля полных смещений вычиталась его историческая составляющая, найденная на первом этапе.

Прочностные и деформационные характеристики грунтового массива, которые были использованы при моделировании, представлены ниже:

Показатель	Единица измерения	Значение
Удельный вес	кН/м ³	23,54
Модуль общей деформации		
Первая задача	МПа	50
Вторая задача:		
1-й вариант (базовый)	МПа	350
2-й вариант	МПа	350
3-й вариант	МПа	350
Коэффициент поперечной деформации		0,35
Угол внутреннего трения массива различной степени нарушенности		
Первая задача	градусы	9
Вторая задача:		
1-й вариант (базовый)	градусы	12
2-й вариант	градусы	15
3-й вариант	градусы	18
Сцепление массива различной степени нарушенности		

Первая задача	МПа	0,05
Вторая задача:		
1-й вариант (базовый)	МПа	0,18
2-й вариант	МПа	0,15
3-й вариант	МПа	0,12

Следует отметить, что характеристики в строке «Первая задача» соответствуют физико-механическим характеристикам грунтов, в которых проводилось строительство перегонных тоннелей на участке между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества».

При выполнении математического моделирования величина пригруза забоя q изменялась в пределах от 100 кПа до 1 МПа; она представлена в долях γH (где γ – удельный вес грунта, кН/м³; H – глубина заложения выработки, м). Первой задачей моделирования было получение графических зависимостей вертикальных и продольных смещений от величины пригруза при фиксированных прочностных и деформационных характеристиках грунтов.

По результатам математического моделирования был построен ряд графических зависимостей продольных смещений массива пород непосредственно за плоскостью забоя. Направление, для которого производились вычисления указанных смещений, совпадает с направлением оси тоннеля от забоя вглубь грунтового массива горных пород.

На рис.3 представлено семейство кривых из названного ряда графических зависимостей для условий строительства перегонных тоннелей на участке между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества». Следует отметить, что на графике представлены лишь случаи, при которых на призабойном участке уже действует пригруз забоя с определенным давлением в зависимости от варианта. При этом случай, при котором проходка тоннеля осуществляется без пригруза, на графике не представлен, так как в этом случае плоскость забоя является неустойчивой, что приводит к образованию вывалов (продольные же смещения в данном случае достигают величин 4-4,5 м).

Как можно заключить из рис.3, даже применение незначительного пригруза поряд-

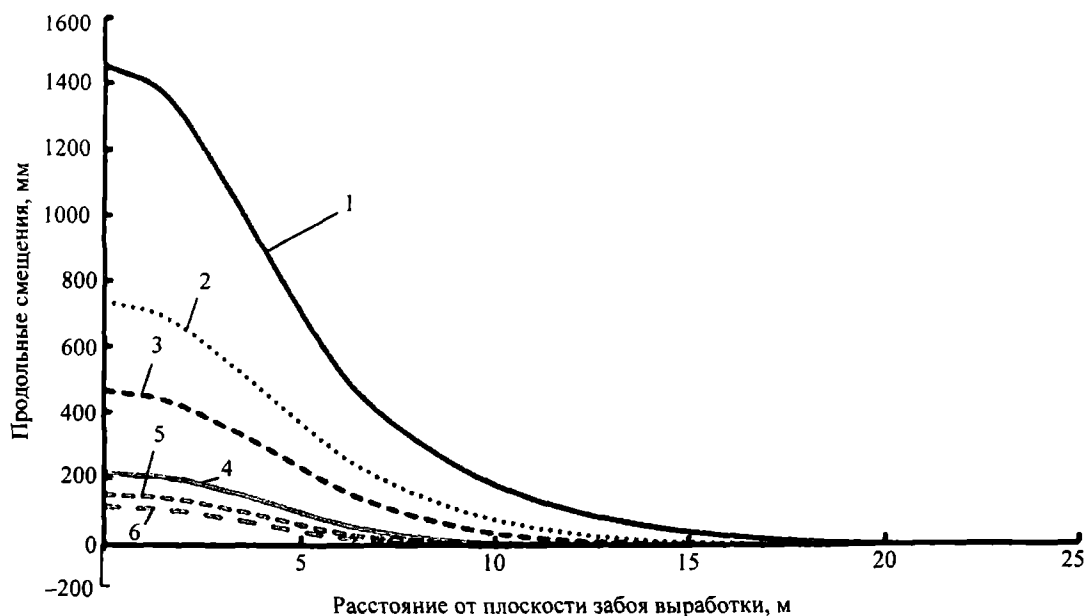


Рис.3. Графики зависимости величины продольных смещений массива от расстояния до плоскости забоя
 $1 - q = 0,1\gamma H$; $2 - q = 0,16\gamma H$; $3 - q = 0,21\gamma H$; $4 - q = 0,31\gamma H$; $5 - q = 0,37\gamma H$; $6 - q = 0,42\gamma H$

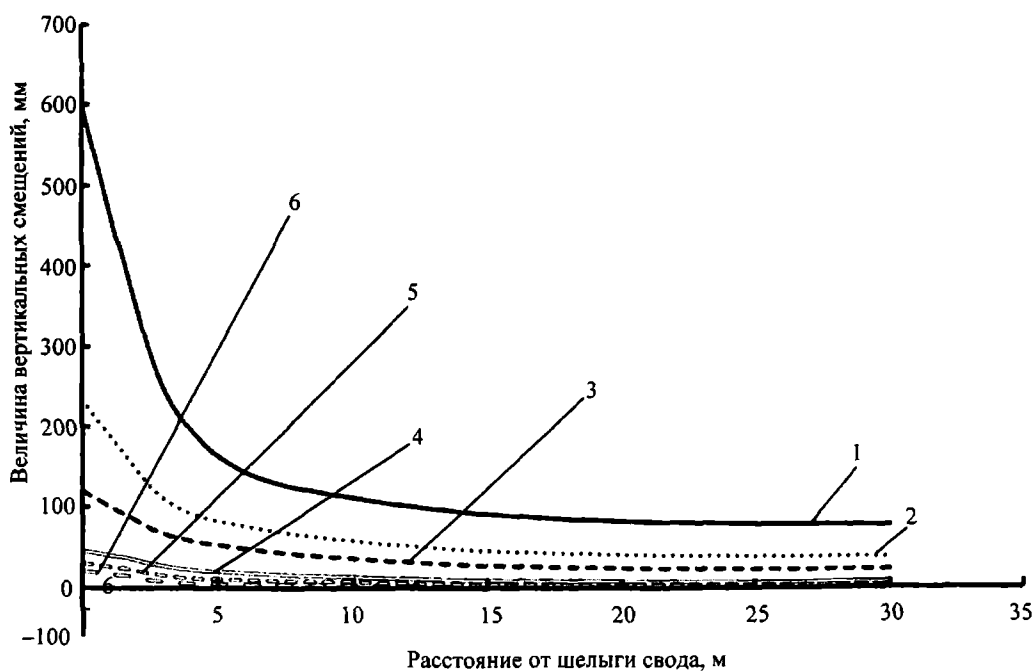


Рис.4. Графики зависимости вертикальных смещений массива на расстоянии 1,5 м от плоскости забоя до шельги свода тоннеля

$1 - q = 0,1\gamma H$; $2 - q = 0,16\gamma H$; $3 - q = 0,21\gamma H$; $4 - q = 0,31\gamma H$; $5 - q = 0,37\gamma H$; $6 - q = 0,42\gamma H$

ка $0,15\gamma H$ позволяет сохранить плоскость забоя устойчивой. Однако в этом случае продольные смещения этой плоскости будут весьма значительными (более 700 мм).

Из построенного на рис.3 семейства кривых можно заметить, что наибольший

эффект от увеличения пригруза достигается при давлении до $0,3\gamma H$. Дальнейшее увеличение давления пригруза не дает значительного уменьшения продольных смещений.

На рис.4 представлено семейство кривых, выражающих зависимость вертикальных сме-

щений породного массива на расстоянии 1,5 м от плоскости забоя тоннеля от расстояния до шельги свода тоннеля. Расстояние в 1,5 м от плоскости забоя до рассматриваемого направления выбрано опытным путем с тем расчетом, что на этом направлении вертикальные смещения пород имеют максимальные значения на поверхности модели. Представленные на рис.4 графические зависимости также строились для условий строительства перегонного тоннеля метрополитена Санкт-Петербурга на участке между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества». Следует отметить, что здесь, как и на рис.3, не представлен случай проходки без использования пригруза, при котором плоскость забоя является неустойчивой (при этом в результате возникновения вывала осадка поверхности составляет порядка 1500 мм).

Как можно заключить из графических зависимостей на рис.4, значения давления пригруза забоя менее $0,40\gamma H$ хоть и позволяют достичь устойчивого состояния забоя, но их применение не предотвращает развитие значительные вертикальных смещений массива, которые в дальнейшем реализуются в виде значительных осадок поверхности, что является недопустимым при строительстве в условиях плотной застройки.

Вид полученных кривых (рис.4) позволяет судить, что вертикальные осадки грунта на расстоянии более 35-40 м от шельги свода тоннеля изменяются незначительно. Следовательно, можно сказать, что оседание поверхности будет незначительно отличаться от вертикальных смещений на расстоянии 40 м от шельги свода тоннеля. Таким образом, в рассмотренных при моделировании условиях, наиболее целесообразно использовать давление пригруза более $0,40\gamma H$ с целью минимизации осадки поверхности.

По результатам анализа полученных в ходе моделирования данных была составлена диаграмма (рис.5); при построении этой диаграммы для грунта принимались следующие прочностные характеристики: $\varphi = 7^\circ$; $C = 50$ кПа. По диаграмме на рис.5 для рассмотренного в статье случая можно по заданным допустимым величинам вертикаль-

ной осадки поверхности определить величину продольного смещения плоскости забоя внутрь тоннеля и необходимую величину пригруза забоя.

Как можно заключить из диаграммы (рис.5), величины вертикальных осадок поверхности меньше предельно допустимых достигаются только при величинах пригруза порядка $0,35\gamma H$. При этом величина продольных смещений плоскости забоя внутрь тоннеля составляет не более 0,18 м.

Достижение полностью безосадочной технологии возможно при величине пригруза порядка $0,38-0,4\gamma H$. Стоит при этом отметить, что при нулевых вертикальных смещениях на земной поверхности смещение плоскости забоя все же будет иметь место и составит порядка 100 мм.

При величинах пригруза более $0,42\gamma H$ на поверхности будет наблюдаться подъем (выпирание) грунта, что крайне нежелательно.

Для проверки адекватности методики прогноза перемещений при строительстве тоннелей в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях были использованы результаты маркшейдерских наблюдений при пересечении зоны «Размыв» в Санкт-Петербурге [4] (рис.6).

Тоннели через «Размыв» общей длиной около 1600 м пройдены механизированным комплексом ALPINE POLYSHIELD PDS 740-09/RM (ТПМК) с внешним диаметром фронтальной части 7385 мм и наружным тоннельной обделки 7100 мм. Комплекс представлял собой проходческий щит с механическим приводом и бентонитовым пригрузом забоя (величина пригруза достигала до 0,5 МПа.). Пространство между оболочкой щита и обделкой сразу после монтажа последнего кольца заполнялось под давлением специальным уплотнительным раствором.

Профильные линии № 2 и 6 расположены в районах крайне неритмичной проходки и длительных остановок проходческого комплекса (4 и 2 мес. соответственно). Это обстоятельство предопределило особенности процесса сдвижения земной поверхности. После пересечения в плане первым тоннелем данных профильных линий оседание над его осью составило 9-10 мм.

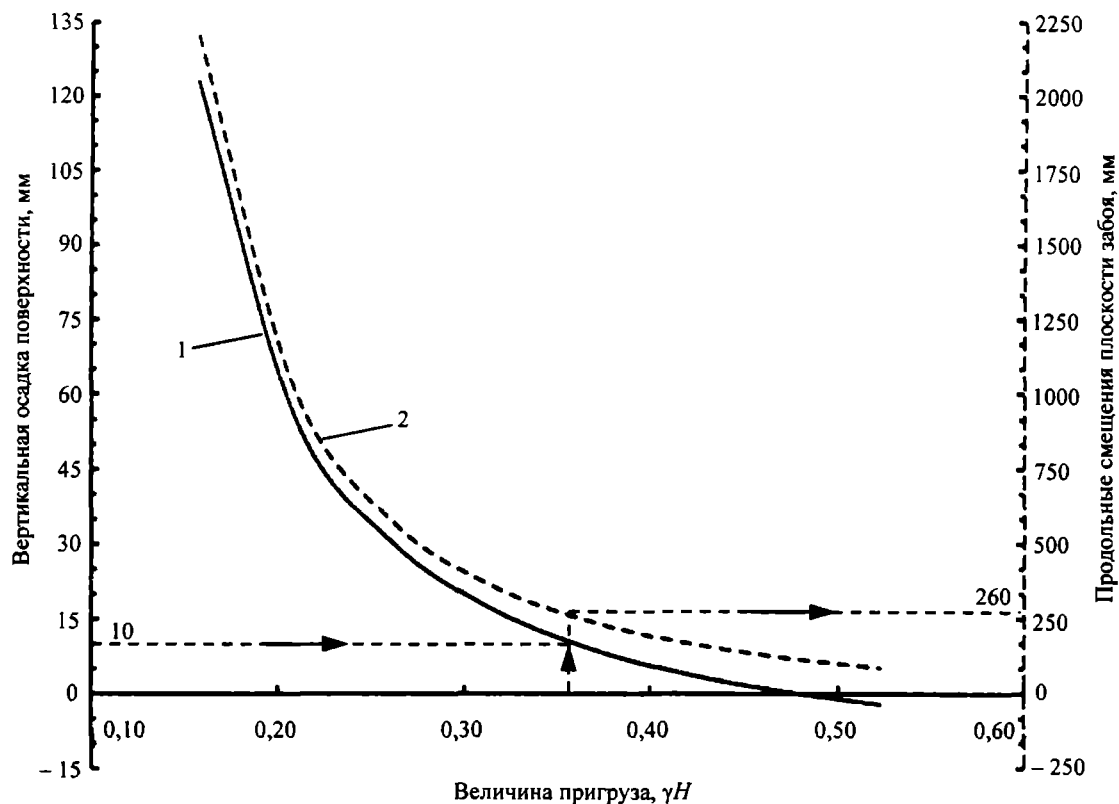


Рис.5. Диаграмма зависимости продольных смещений по оси тоннеля за лбом забоя (1) и вертикальных смещений земной поверхности от величины пригруза (2)

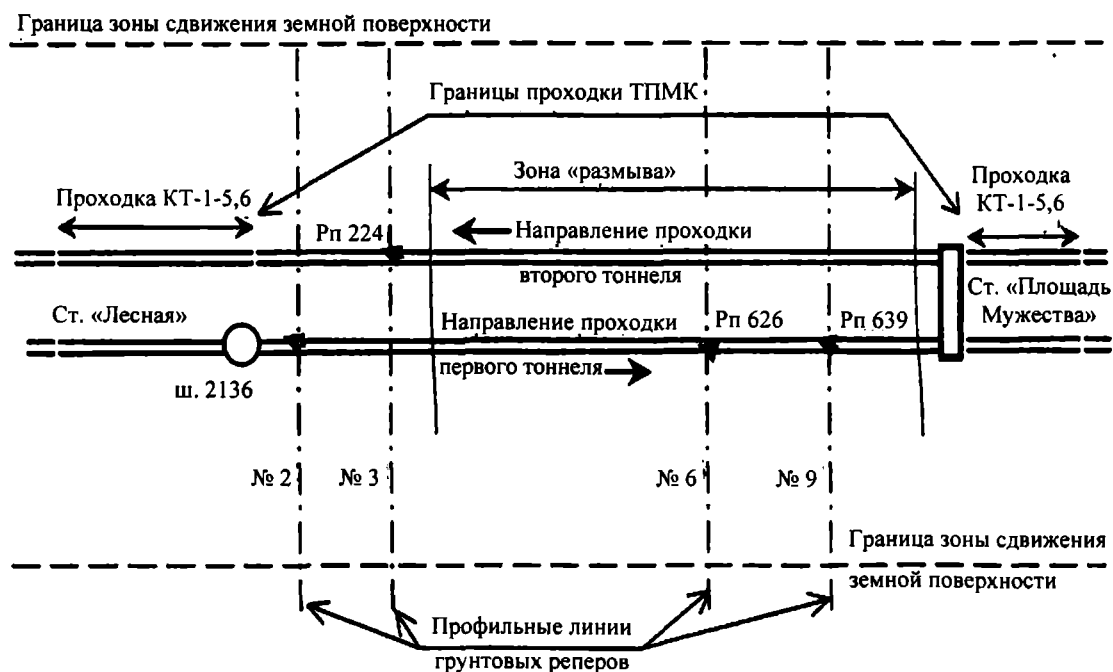


Рис.6. Схема восстановления сквозного движения между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества» и расположения профильных линий для измерения осадок земной поверхности

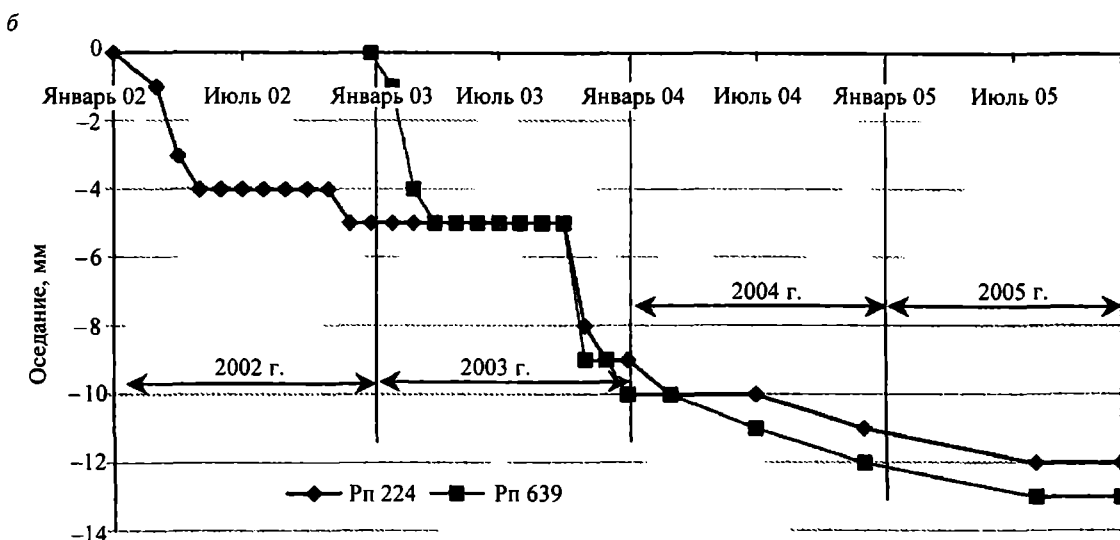
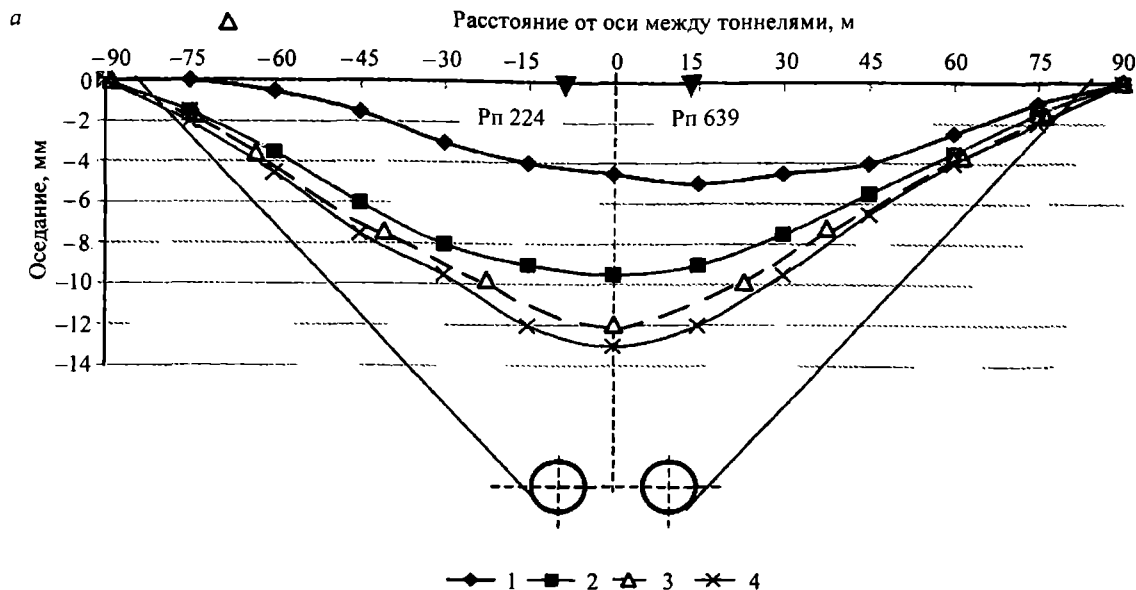


Рис. 7. Динамика оседания земной поверхности по профильным линиям грунтовых реперов в районах длительных остановок проходческого комплекса в протерозойских глинах (профильная линия № 3, Рп 224) и в зоне «Размыв» (профильная линия № 9, Рп 639): а – по профильным линиям Рп 224 и Рп 639; б – во времени по профильным линиям Рп 224 и Рп 639

1 – после проходки первого тоннеля под профильными линиями № 3 и 9; 2 – после проходки второго тоннеля под профильными линиями № 3 и 9; 3 – в декабре 2004 г. (после завершения сооружения тоннелей); 4 – в декабре 2005 г. (в период эксплуатации тоннелей)

На рис. 7 представлены мульды сдвижения земной поверхности и графики нарастания оседания по профильным линиям № 3 и 9 грунтовых реперов, под которыми проходка ТПМК производилась относительно равномерно (без остановок). Данные свидетельствуют, что при непрерывной проходке как в протерозойских глинах, так и в неустойчивых грунтах плавунного типа, максимальное оседание земной поверхности после

проходки обоих тоннелей не превышает 8-10 мм. В 2004 г. оседание увеличилось на 2-3 мм, в 2005 г. – еще на 1 мм. Максимальные значения деформаций земной поверхности в этом случае составляют: наклон 0,2 мм/м, кривизна $0,1 \times 10^4$ 1/м (радиус кривизны $R = 100$ км) [3].

При маркшейдерских наблюдениях выявлено также влияние проходки тоннелей на осадки зданий [4].

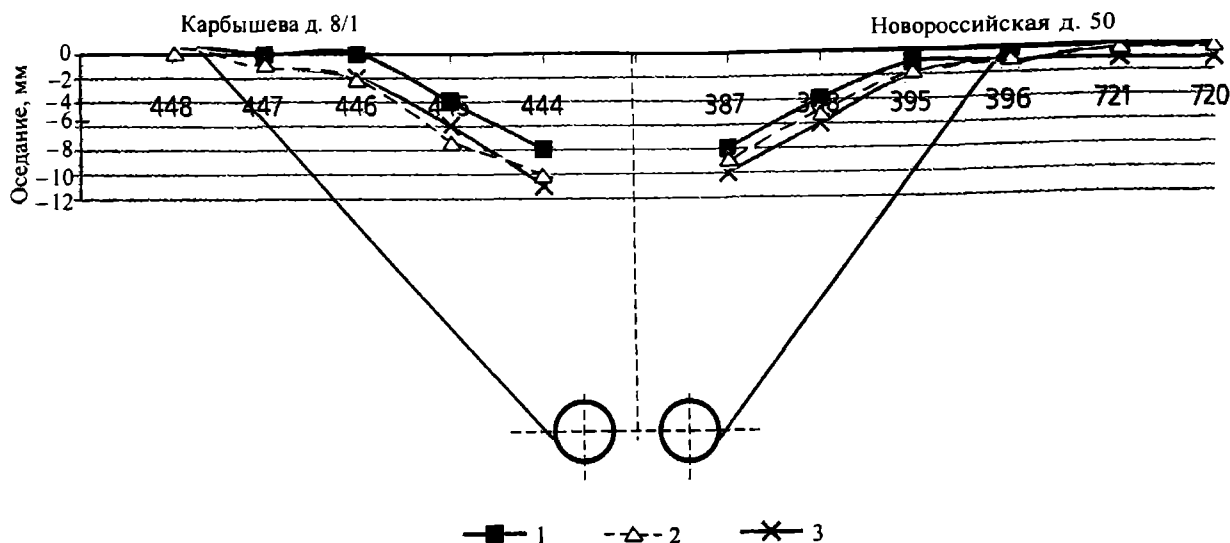


Рис. 8. Графики оседаний стенок марок, расположенных на цоколе зданий по ул. Карбышева д. 8/1 и ул. Новороссийской д. 50

1 — после проходки второго тоннеля (декабрь 2003 г.); 2 — в декабре 2004 г. (после завершения сооружения тоннелей); 3 — в декабре 2005 г. (в период эксплуатации тоннелей)

Здание (ул. Новороссийская, 50) расположено перпендикулярно первому тоннелю. Графики, построенные по стенным маркам, установленным по длинной стороне этого здания (рис.8), показывают, что после проходки тоннеля в районе его нахождения было зафиксировано оседание трех ближайших к оси тоннеля марок (максимальное значение 8 мм). В 2004 и 2005 гг. произошло оседание марок на величину до 1 мм. Максимальные значения деформаций земной поверхности при этом составили: наклон $0,2 \text{ мм/м}$, кривизна $0,1 \times 10^4 \text{ 1/м}$ (радиус кривизны $R = 100 \text{ км}$).

Второй задачей моделирования было выявление влияния деформационных и прочностных свойств грунтов на необходимую величину пригруза для минимизации вертикальных осадок земной поверхности. Для этой цели было составлено шесть моделей. В первых трех моделях фиксировалось значение угла внутреннего трения $\varphi = 12^\circ$, а значение сцепления принимало один из трех вариантов. В других трех моделях наоборот — фиксировалось значение сцепления $C = 120 \text{ кПа}$, а изменялись уже значения угла внутреннего трения. По результатам описанного моделирования были построены графические зависимости, представленные на рис.9.

Из полученных зависимостей следует, что при прочих равных условиях на устойчивость плоскости забоя тоннеля большее влияние оказывает угол внутреннего трения грунта по сравнению с его величиной сцепления. При этом наибольшие изменения в величине вертикальной осадки поверхности происходят именно в зоне применения малых значений давления пригруза ($0,03-0,15\gamma H$).

Влияние сцепления на необходимую величину пригруза для обеспечения минимальной осадки поверхности также происходит в зоне малых значений пригруза; при значении давления пригруза более $0,25\gamma H$ сцепление практически перестает влиять на величину осадки поверхности. Следует отметить, что значение угла внутреннего трения в свою очередь влияет на величину осадки поверхности при любой из рассмотренных в данной статье величин давления пригруза.

Из приведенных результатов следует, что для поддержания плоскости забоя от обрушения требуется создать незначительный по отношению к величине вертикальной составляющей геостатического поля напряжений пригруз (порядка $0,1-0,2\gamma H$). Однако, применение такого пригружающего давления не обеспечит безосадочной техно-

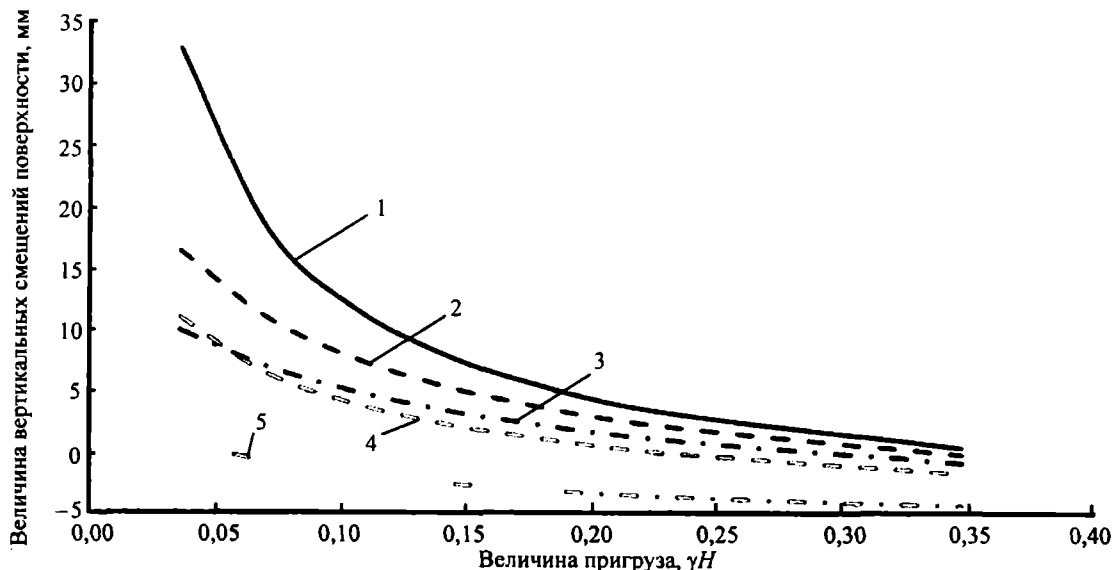


Рис.9. Графики зависимости вертикальных осадок поверхности от величины пригруза при различных прочностных свойствах массива

1 – $C = 120$ кПа, $\varphi = 12^\circ$; 2 – $C = 150$ кПа, $\varphi = 12^\circ$; 3 – $C = 180$ кПа, $\varphi = 12^\circ$; 4 – $C = 120$ кПа, $\varphi = 15^\circ$; 5 – $C = 120$ кПа, $\varphi = 18^\circ$

логии строительства, а потому применимо только при строительстве горных тоннелей, т.е. при отсутствии плотной застройки поверхности. Для обеспечения минимальной осадки поверхности необходимо создание большего по величине пригруза ($> 0,25\gamma H$).

На основании сравнения результатов математического моделирования с натурными данными маркшейдерских съемок при строительстве перегонных тоннелей между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества» метрополитена Санкт-Петербурга можно отметить достаточно хорошую их сходимость (погрешность в определении величины вертикального оседания поверхности составляет порядка 1-2 мм).

Кроме того, в результате выполненного моделирования было выявлено, что на необходимую величину пригруза забоя для минимальной осадки поверхности большее влияние оказывает величина угла внутреннего трения породы по сравнению с величиной сцепления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор тоннелепроходческих механизированных комплексов с активным пригрузом забоя при строительстве тоннелей в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях. М.: ООО «ТА Инжиниринг», 2004. 94 с.

2. Гарбер В.А. Пространственное моделирование при строительстве транспортных тоннелей / В.А.Гарбер, А.А.Кашко, Д.В.Панфилов // Метро и тоннели. 2004. № 5. С.46-48.

3. Исследование пространственного напряженно-деформированного состояния обделки наклонного хода станции метрополитена глубокого заложения / А.Г.Протосеня, М.А.Карасев, Н.А.Беляков, И.К.Супрун // Труды 8-й Научно-практической конференции «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения». Том 1. Воркута, 2010. С.133-137.

4. Козин Е.Г. Исследование процесса сдвижения земной поверхности на участке между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества» в Санкт-Петербурге / Е.Г.Козин, Б.М.Савков, В.П.Хуцкий // Метро и тоннели. 2006. № 4. С.32-35.

REFERENCES

1. Selection of the tunnel boring machine with active contledge of the face in the case of construction of the tunnels in heavy geotechnical and architectural conditions. Moscow: «TA Engineering» Ltd., 2004. 94 p.

2. Garber V.A. Volume modeling of the transport tunnel construction / V.A.Garber, A.A.Kashko, D.V.Panfilov // Metro and tunnels. 2004. № 5. P.46-48.

3. The investigation of the volume stress-strain condition of the support lining of the inclined passage to the metro station of the deep bedding / F.G.Protosenya, M.A.Karasev, N.A.Belyakov, L.K.Suprun // The proceedings of the 8th theoretical and practical conference «The mastering of the mineral resources of the North: problems and decisions», Vol. 1. Vorkuta, 2010. P.133-137.

4. Kozin E.G. The investigation of the process of displacement of the earth surface in the area between metro stations «Forestry» and «Square of courage» in Saint-Petersburg / E.G.Kozin, B.M.Savkov, V.P.Hutzky // Metro and tunnels. 2006. № 4. P.32-35.