

И.К.СУПРУН, аспирант, *igor_suprun@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

I.K.SUPRUN, post-graduate student, *igor_suprun@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ПРОГНОЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ С ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ

Приводится анализ упрочняющего эффекта в призабойной зоне при механизированной проходке подземных сооружений тоннелепроходческими механизированными комплексами (ТПМК) с пригрузом забоя. 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, тоннелепроходческие механизированные комплексы, пригруз, забой, смещение, деформация, напряжения, осадки поверхности, размыв.

PREDICTION OF SPATIAL STRESS-STRAIN SOIL MASS STATE TUNNELING TECHNOLOGY WITH KENTLEDGE OF THE WORKING FACE

In this article the analysis of reinforcing effect, which appears during the process of the drilling of tunnels with using of kentledge of the face which applied in Tunnel Boring Machines (TBM), 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. The influence of the main strength characteristics of Couloumb-Mohrs's theory of strength on stability of the face of the tunnel and the necessary value of kentledge of the tunnel's face are defined.

Key words: tunnel, tunnel boring machines, kentledge, face, displacement, strain, stress, earth's surface yielding, scour.

Подземное пространство Санкт-Петербурга имеет сложное геологическое и гидрогеологическое строение. На устойчивость подземных сооружений оказывают влияние тектоника, физико-механические свойства грунтов, величина и закономерности распределения нагрузок и характер их взаимодействия с окружающим массивом.

В течение последних 30 лет в технике и технологии щитовой проходки тоннелей произошли существенные изменения. В первую очередь эти изменения коснулись прин-

ципа работы механизированного щита и его конструкции, что является определяющим в составе ТПМК и в технологии сооружения тоннелей.

В настоящее время, как правило, при строительстве подземных сооружений в сложных гидрогеологических и градостроительных условиях используют ТПМК с различными видами пригруза забоя [1]. Создано несколько типов щитов нового поколения с герметичной забивной камерой и устройствами для активного пригруза забоя.

Это позволило вести проходку тоннелей диаметром от 2 до 14 м в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях без применения дорогостоящих и трудоемких методов закрепления неустойчивых грунтов и водопонижения со значительными скоростями (до 300 м в месяц) и с небольшими осадками земной поверхности (до 30 мм).

Устойчивость забоя по этой технологии достигается использованием в щитовой машине активного пригруза. Активный пригруз – это регулируемое давление на всю площадь забоя, действующее постоянно в процессе проходки тоннеля и уравновешивающее горное давление грунта и гидростатическое давление грунтовых вод. Такой пригруз осуществляется непрерывно в виде давления на забой бентонитового раствора, нагнетаемого в герметичную забойную камеру механизированного щита, или давления разработанного грунта.

Преимуществом технологии строительства с применением ТМПК с пригрузом является возможность избежания потери устойчивости забоя в процессе проходки за счет его постоянного подпора силой пригруза (грунтопригруз, гидропригруз, пневмопригруз и пенопригруз).

При правильном выборе усилия пригруза можно добиться полной компенсации смещений плоскости забоя внутрь выработки, что позволит избежать осадок поверхности, т.е. создать практически безосадочную технологию строительства. Технология сооружения тоннелей механизированными щитами с активным пригрузом забоя требовала создания высокоточных водонепроницаемых сборных железобетонных обделок с эластичными прокладками в стыках блоков. Такие обделки обеспечивают водонепроницаемость тоннеля сразу же после окончания монтажа кольца и обжатия его щитовыми домкратами. С целью обеспечения минимальных осадок земной поверхности разработаны новые технологии тампонажа заобделочного пространства и составы тампонажных растворов. Проходка с использованием ТМПК с пригрузом забоя позволяет получить высокие скорости проход-

ки при строительстве в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях за счет высокой степени механизации труда проходчиков. Некоторые вопросы пространственного моделирования геомеханических процессов при строительстве тоннелей с применением ТМПК рассмотрены в работах В.А.Гарбера, А.А.Кашко, Д.В.Панфилова, А.Г.Протосени, М.А.Карасёва, Н.А.Белякова и др. [2-4].

Для ведения механизированного щита по заданной трассе и оперативного контроля за работой его узлов и агрегатов использованы компьютерные технологии. Работа механизированных щитов с гидропригрузом обеспечивается с помощью специального оборудования для приготовления и регенерации бентонитовых растворов. Такое оборудование позволяет в максимальной степени отделять разработанный в забое грунт от пульпы и после обогащения повторно перекачивать ее в забойное пространство.

Для исследования влияния усилия пригруза забоя на напряженно-деформированное состояние массива была выполнена математическая модель участка породного массива, вмещающего тупиковую выработку кругового очертания, закрепленную бетонной крепью, а в головной части – оболочкой ТМПК. 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 к плоскости забоя и стенкам тоннеля на участке между этой плоскостью и оболочкой ТМПК.

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 принимается равным 7,1 м, а глубина заложения – 50 м. Выбор именно таких параметров проходки обусловлен тем, что результаты моделирования в дальнейшем сопоставляются с натурными данными, полу-

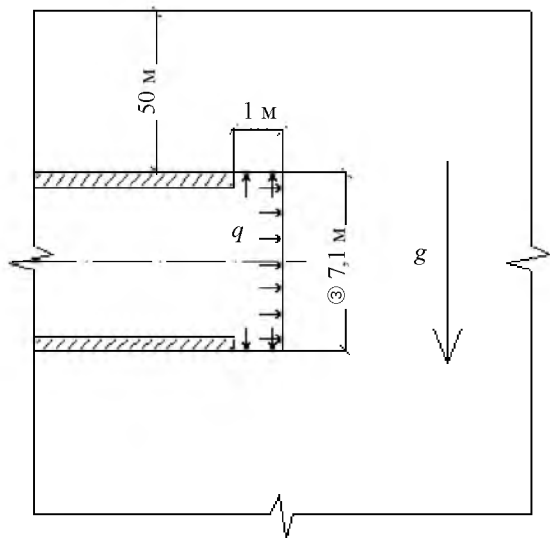


Рис.1. Расчетная схема

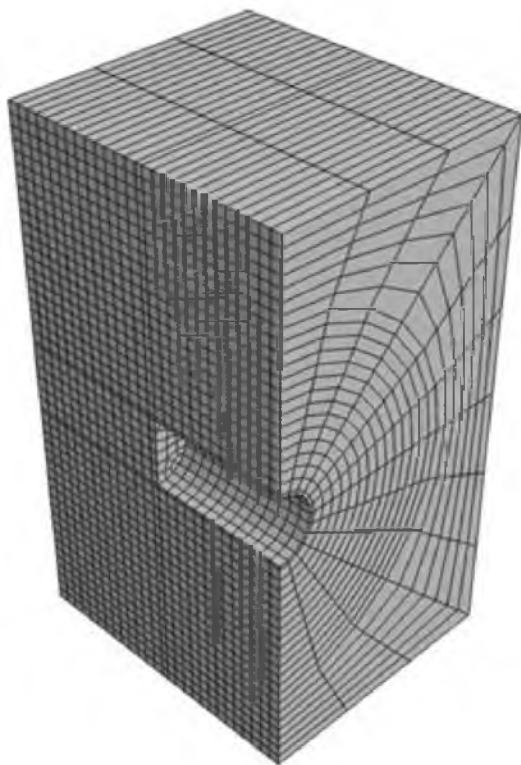


Рис.2. Фрагмент конечно-элементной модели

ченными при проведении перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена на участке между станциями «Лесная» – «Площадь Мужества».

Фрагмент анализируемой конечно-элементной модели представлен на рис.2. Размеры модели в направлении осей x и y

превышают размеры выработки в 7 раз. Задача решалась в объемной постановке. 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 пригрузки забоя при проведении выработки на смещения массива в ходе решения поставленной задачи вычислялось начальное поле напряжений и исторические смещения в нетронутом массиве под действием собственного веса при граничных условиях, приведенных выше.

Прочностные и деформационные характеристики грунтового массива, которые были использованы при моделировании, соответствуют физико-механическим характеристикам грунтов, в которых проводилось строительство перегонных тоннелей на участке между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества»:

- удельный вес $23,54 \text{ кН/м}^3$;
- модуль общей деформации 50 МПа ;
- коэффициент поперечной деформации $0,35$;
- угол внутреннего трения массива различной степени нарушенности 9° ;
- сцепление массива различной степени нарушенности $0,05 \text{ МПа}$.

При выполнении математического моделирования величина пригрузки забоя $q = 0,1 \div 1 \text{ МПа}$. Она представлена в долях γH (γ – удельный вес грунта, кН/м^3 ; H – глубина заложения выработки, м). По результатам моделирования получен ряд графических зависимостей вертикальных и продольных смещений от величины пригрузки забоя при фиксированных прочностных и деформационных характеристиках грунтов, а также 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 представлены кривые для условий строительства перегонных тоннелей на участке «Лесная – Площадь Мужества» Санкт-Петербургского метрополитена. Следует отметить, что на графике представлены

только случаи, при которых на призабойном участке уже действует пригруз забоя с определенным давлением в зависимости от варианта. При этом вариант, при котором проходка тоннеля осуществляется без пригруза, на графике не представлен, так как в этом случае плоскость забоя неустойчива.

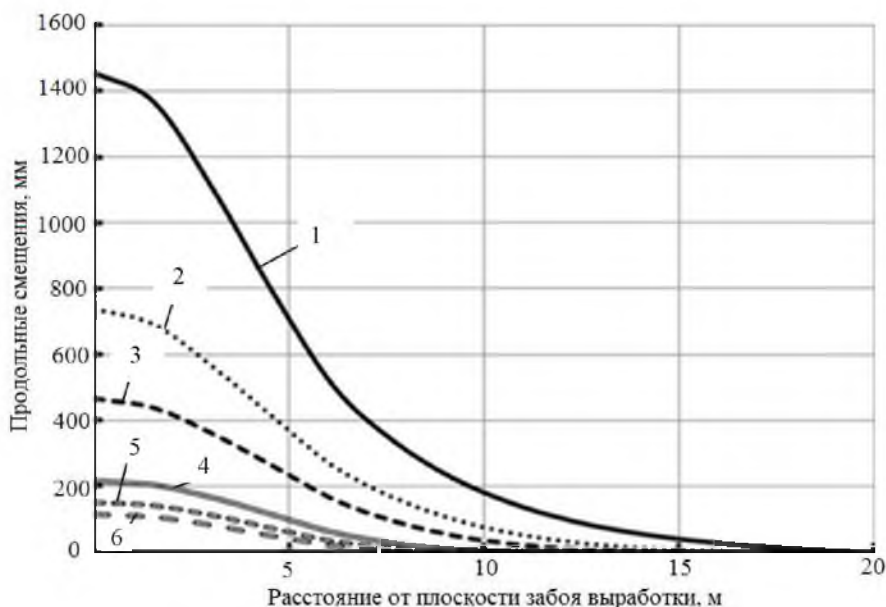


Рис.3. Зависимости продольных смещений массива от расстояния до плоскости забоя
1 – $q = 0,1\gamma H$; 2 – $q = 0,16\gamma H$; 3 – $q = 0,21\gamma H$; 4 – $q = 0,31\gamma H$; 5 – $q = 0,37\gamma H$; 6 – $q = 0,42\gamma H$

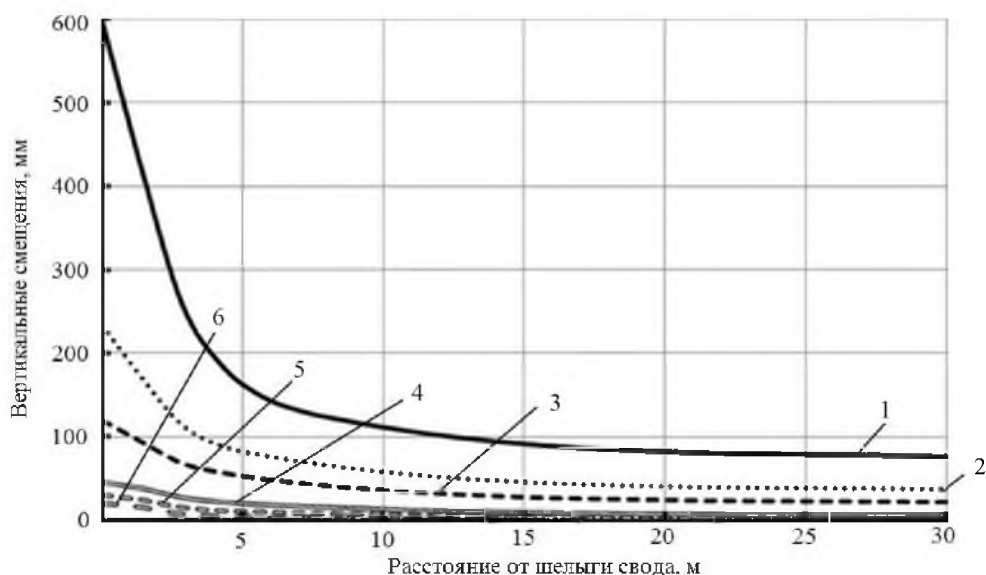


Рис.4. Зависимости вертикальных смещений массива (расстояние 1,5 м от плоскости забоя) от расстояния до шельги свода тоннеля

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 – $q = 0,42\gamma H$

Это приводит к образованию вывалов (продольные смещения достигают 4-4,5 м).

Согласно графику, применение даже незначительного пригруза ($0,15\gamma H$) позволяет сохранить плоскость забоя в устойчивом состоянии. Однако в этом случае продольные смещения этой плоскости будут весьма значительными – более 700 мм. 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 представлены кривые, выражающие зависимость вертикальных смещений породного массива (расстояние 1,5 м от плоскости забоя) от расстояния до шельги свода тоннеля. Расстояние 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. На рисунке не представлен случай проходки без использования пригруза, при котором плоскость забоя неустойчива (при этом в результате возникновения вывала осадка поверхности составляет 1500 мм).

Как можно заключить из графических зависимостей, значения давления пригруза забоя менее $0,40\gamma H$ хоть и позволяют достичь устойчивого состояния забоя, но не предотвращают развитие значительных вертикальных смещений массива, которые в дальнейшем реализуются в виде значительных осадок поверхности. Это недопустимо при строительстве в условиях плотной городской 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, 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). Для грунта принимались следующие прочностные характеристики: $\varphi = 70^\circ$ и $C = 50$ кПа. По диаграмме для рассмотренного в статье случая можно по заданной допустимой вертикальной осадке поверхности определить продольное смещение плоскости забоя внутрь тоннеля и необходимую величину пригруза забоя.

Из диаграммы видно, что вертикальные осадки поверхности меньше предельно допустимых достигаются только при величине пригруза $0,35\gamma H$. При этом продольные смещения плоскости забоя внутрь тоннеля составляют не более 0,18 м. Достижение полностью безосадочной технологии возможно при величине пригруза $0,38-0,4\gamma H$. Стоит отметить, что при нулевых вертикальных смещениях на земной поверхности, смещение плоскости забоя все же будет иметь место и составит 100 мм. При величине пригруза более $0,42\gamma H$ на поверхности будет наблюдаться 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 [5].

ТПМК нового поколения позволили решить ряд сложнейших задач, которые стояли перед строителями тоннелей:

- достигнуты очень высокие скорости проходки (до 300 м в месяц) в неблагоприятных инженерно-геологических и градостроительных условиях;
- появилась возможность сооружения тоннелей в условиях плотной городской застройки без остановки эксплуатации зданий и сооружений в зоне возможных деформаций и без применения специальных методов работ (искусственное водопонижение или укрепление неустойчивых грунтов), а также ведение работ в зоне охраняемых территорий;
- полностью ликвидирован тяжелый ручной труд проходчиков в забое, повышена безопасность работ;

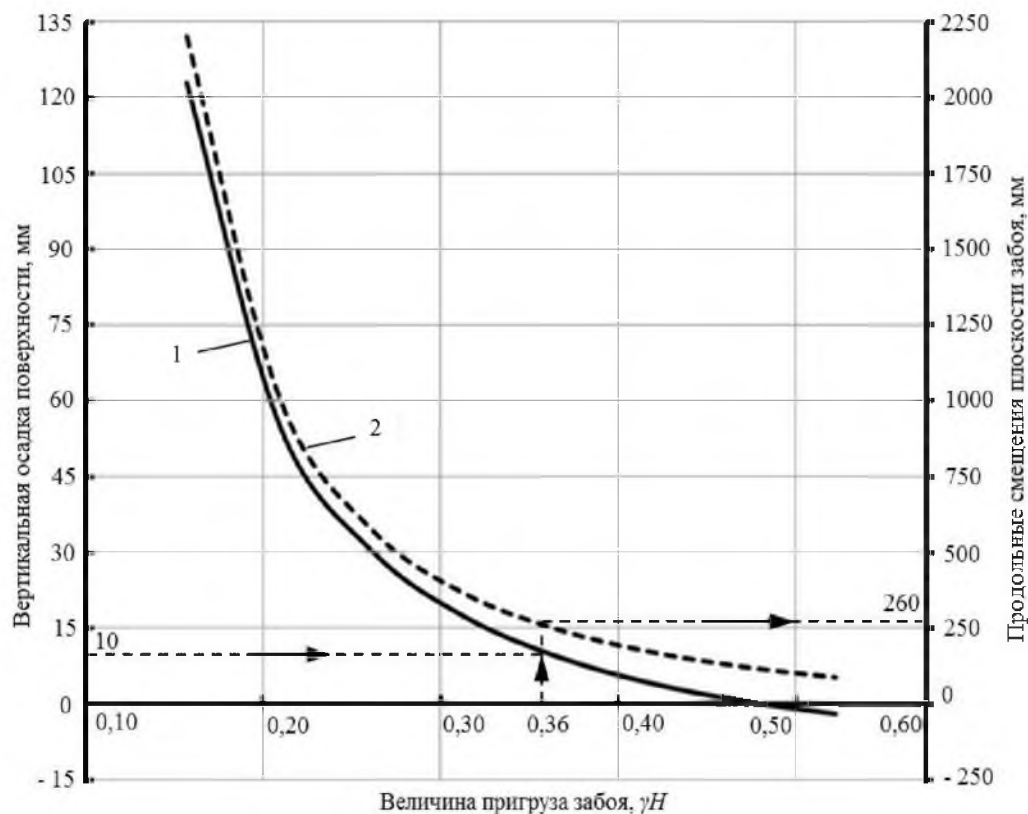


Рис.5. Диаграмма зависимости продольных смещений по оси тоннеля за лбом забоя (1) и вертикальных смещений земной поверхности от величины пригруза забоя (2)

- значительно уменьшен риск возникновения аварийных ситуаций;
- обеспечена возможность применения надежных водонепроницаемых обделок с высокой точностью их монтажа;
- исключено вредное влияние на окружающую среду, сохранение уровня грунтовых вод;
- достигнуты положительный экономический эффект и сокращение сроков строительства по сравнению с использованием специальных методов работ.

Применительно к конкретным инженерно-геологическим и градостроительным условиям каждый тип механизированного щита с присущим ему видом активного пригруза забоя имеет свою область эффективного применения.

Подбор типа механизированного щита и величины пригруза применительно к конкретным инженерно-геологическим условиям, а также комплекс сопутствующего обо-

рудования и соответствующей обделки является сложной технико-экономической задачей.

Статья подготовлена по результатам НИР, выполненных по госконтракту № 16.515.11.5080 от 10.10.2011 «Разработка научно-технических основ геомеханически безопасного освоения подземного пространства мегаполисов в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях».

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор тоннелепроходческих механизированных комплексов с активным пригрузом забоя при строительстве тоннелей в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях. М., 2004. 94 с.
2. Гарбер В.А. Пространственное моделирование при строительстве транспортных тоннелей / В.А.Гарбер, А.А.Капко, 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». Воркута, 2010. Т.1. С.133-137.

4. *Протосеня А.Г.* Определение пространственного напряженно-деформированного состояния слабого грунтового массива в призабойной части при проходке тоннеля с использованием пригруза забоя / А.Г.Протосеня, Н.А.Беляков // Записки Горного института. 2011. Т.190. С.149-157.

5. *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 tun-

nels in heavy geotechnical and architectural conditions. Moscow, 2004. 94 p.

2. *Garber V.A., Kashko A.A., Panfilov D.V.* Volume modeling of the transport tunnel construction // Metro and tunnels. 2004. N 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 / A.G.Protosenay, M.A.Karasev, N.A.Belyakov, I.K.Suprun // The proceedings of the 8th theoretical and practical conference «The mastering of the mineral resources of the North: problems and decisions». Vorkuta, 2010. Vol.1. P.133-137.

4. *Protosenya A.G., Belyakov N.A.* The determination of the volume stress-strain conditions of the soil massif in the fase area of the tunnel in conditions of drafting with using of contledge of the fase // Note mining institute. 2011. Vol.190. P.149-157.

5. *Kozin E.G., Savkov B.M., Hutzky V.P.* 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 // Metro and tunnels. 2006. N 4.P. 32-35.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор *А.Г.Протосеня*