

# СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

**ВОЛОХОВ Е.М.** (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»)

**НОВОЖЕНИН С.Ю.** (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»)

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТА КАК СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОХОДКИ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ

В статье рассмотрен новый метод строительства эскалаторных тоннелей тоннелепроходческими механизированными комплексами в Санкт-Петербурге. Для снижения вредного влияния подземного строительства на земную поверхность в устьевой части тоннеля применяется технология струйной цементации породного массива. На основе анализа данных натурных наблюдений за сдвижением земной поверхности и породной толщи доказана эффективность применяемой технологии. Оседания, зафиксированные в массиве и на поверхности в пределах грунтоцементного участка, практически нулевые. Показано, что развитие опасных оседаний и деформаций происходит в основном за пределами зоны струйной цементации грунта. Предложен способ снижения этих оседаний за счет дополнительной цементации неустойчивых пород в массиве, которая позволит уменьшить вредное влияние подземного строительства на массив и земную поверхность. Для оценки эффективности предложенного метода проведено численное моделирование на основе метода конечных элементов. Результаты расчетов показывают, что предлагаемая методика позволит снизить оседания на земной поверхности в 2–3 раза.

**Ключевые слова:** сдвижение и деформации, эскалаторный тоннель, струйная цементация, данные натурных наблюдений, моделирование, МКЭ.

В настоящее время в практике строительства эскалаторных тоннелей метрополитена в городской черте специалистам приходится сталкиваться с серьезными трудностями, которые вызваны сложностью инженерно-геологических условий, ограниченностью размеров промплощадок для строительства, жесткими требованиями к обеспечению безопасности

существующих сооружений, расположенных вблизи участка строительства. Одним из наиболее эффективных методов, обеспечивающих решение указанных выше проблем, является проходка эскалаторных тоннелей с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) с активным пригрузом забоя, ставшая особенно актуальной в последнее время (рис. 1).

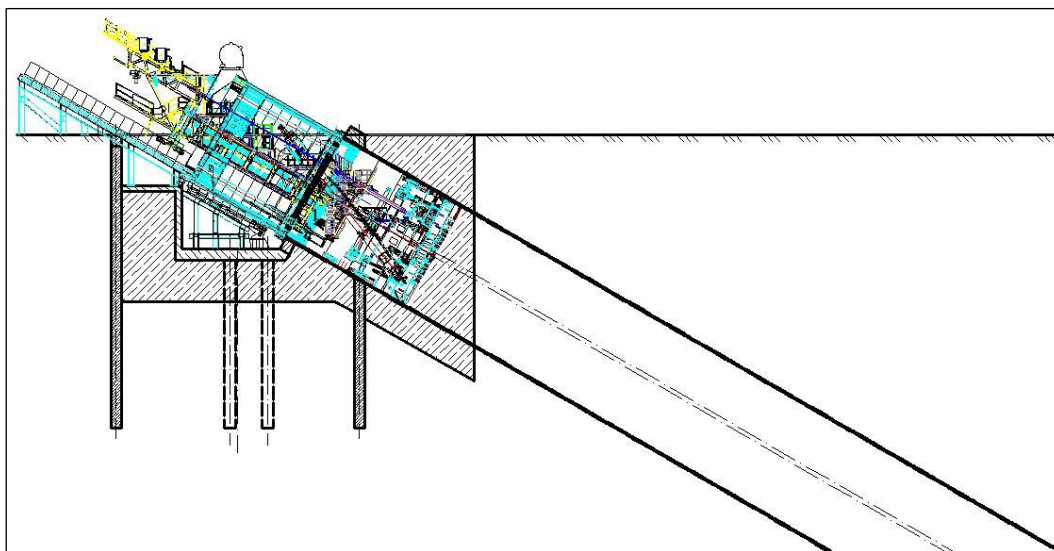


Рис. 1. Схема проходки эскалаторного тоннеля с использованием ТПМК



## СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Наибольшее влияние на величину сдвижений в мульде на земной поверхности оказывают физико-механические характеристики пород и смещения пород контура выработки (конвергенции), определяемые технологическими режимами проходки (давлением пригруза, степенью заполнения тампонажным раствором заобделочного пространства). Практика проходки эскалаторных тоннелей с применением ТПК в Санкт-Петербурге показала, что обеспечить отсутствие сдвижений пород по контуру тоннеля за счет четкого соблюдения технологических режимов невозможно. Обеспечить нулевую конвергенцию такая технология пока позволить не может, оседания пород в шельге свода за пределами зоны струйной цементации при любых условиях будут не ниже 50–60 мм [1].

Основным способом снижения оседаний на поверхности следует признать использование методов, позволяющих изменить свойства окружающих тоннель пород, например применение струйной цементации грунта (jet grouting) вблизи устья тоннеля (рис. 2). Варианты такого укрепления

пород, получившие широкое распространение и характеризующиеся высокими технологическими показателями, освещены в работах Lunardi [2], Mitchell [3], Moseley and Kirsch [4], Малинина [5]. В статьях Burke [6] и Miki and Nakanishi [7] рассмотрены особенности метода струйной цементации грунтов. Вопросам практического применения технологии струйной цементации в городском строительстве посвящены труды Hamidi [8], Tornaghi and Cippo [9].

Кроме снижения оседаний поверхности, применение данной технологии может сопровождаться значительным поднятием участка цементации (на величины 0,5–0,8 м), что накладывает дополнительные ограничения при использовании такой технологии.

Данные натуральных маркшейдерских наблюдений при строительстве эскалаторных тоннелей станций метро «Адмиралтейская», «Спаская» подтверждают эффективность укрепления ослабленных грунтов массива с помощью метода струйной цементации для снижения оседаний, проявляющихся на земной поверхности.

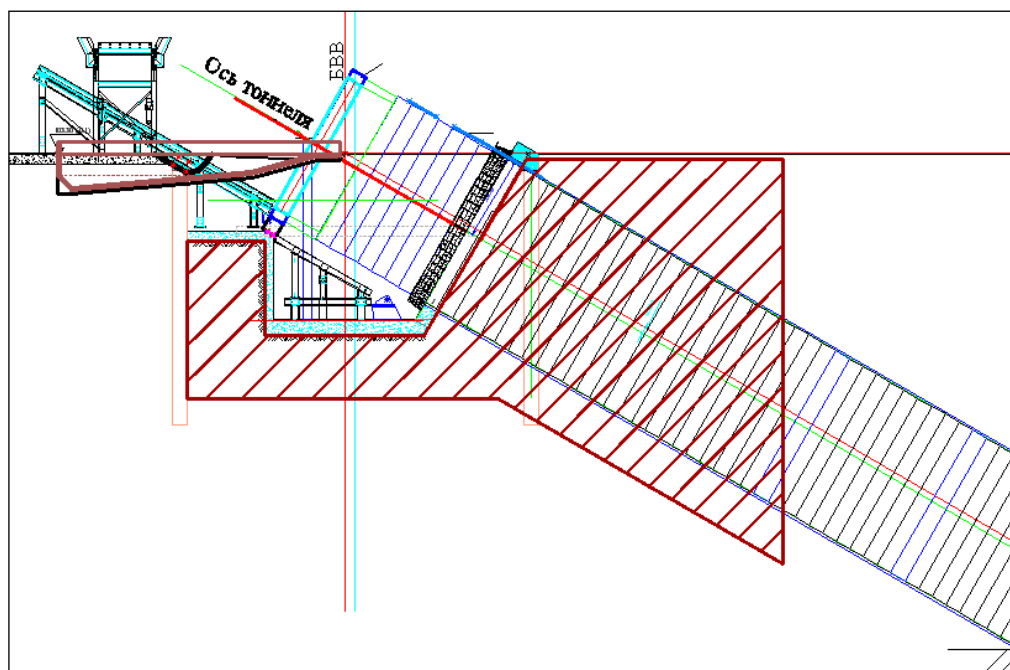


Рис. 2. Участок струйной цементации грунтов при строительстве эскалаторного тоннеля станции метро «Спаская» в разрезе по оси тоннеля



## СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

В целях исследования вопроса был проведен анализ данных натуральных маркшейдерских наблюдений за сдвижением пород как традиционными геодезическими способами (нивелирование оседаний по стенным реперам, наблюдение марок на фасадах зданий), так и методом скважинного мониторинга с применением экстензометров.

Сущность метода состоит в том, что в направлении оси тоннеля и перпендикулярно ей бурят вертикальные скважины, в которых на разных глубинах (с шагом примерно 10 м) в породе закрепляются экстензометры. Эти устройства позволяют получать информацию о смещении точки установки в глубине массива относительно устья скважины. Следует особо отметить необходимость нивелирования оголовков скважин для получения значений полных вертикальных смещений точек в породной толще. Основным достоинством скважинного мониторинга является возможность непрерывного автоматизированного получения данных, что позволяет проследить механизм возникновения и выявить закономерности распределения оседаний в массиве в целом.

При строительстве эскалаторного тоннеля станции «Адмиралтейская» скважина Э1 с экстензометром располагалась в пределах зоны закрепления грунта (рис. 3). Наблюдения показали, что в укрепленной области смещения точек и на поверхности, и в глубине массива оказались практически

нулевыми. Таким образом, можно сделать вывод, что участок струйной цементации полностью выполнил функцию сдерживания оседаний [4].

Анализ оседаний по глубинным реперам позволяет с уверенностью говорить о том, что наиболее интенсивно геомеханические процессы развиваются в первой части массива по длине трассы тоннеля за пределами зоны струйной цементации. Оседания в этой зоне развиваются неравномерно по глубине, максимальные значения в шельге свода тоннеля превышают 100 мм, уменьшаясь с приближением к поверхности. В случае проходки эскалаторного тоннеля станции «Спаская» максимальное оседание земной поверхности (44 мм) зафиксировано в устье скважины Э1, расположенной на расстоянии 7,4 м от зоны грунтозакрепления.

Закономерности развития сдвижений и деформаций, выявленные на основании анализа данных натуральных наблюдений, позволили условно разделить трассу тоннеля в массиве на три участка согласно интенсивности развития оседаний (рис. 4):

1. Зона минимальных оседаний – ТПК проходит участок струйной цементации устьевой зоны промплощадки. Значения оседаний, зафиксированные маркшейдерскими наблюдениями, находятся в пределах точности проводимых измерений.



Рис. 3. Скважина Э1 с глубинным репером (экстензометром), заложенным на участке струйной цементации



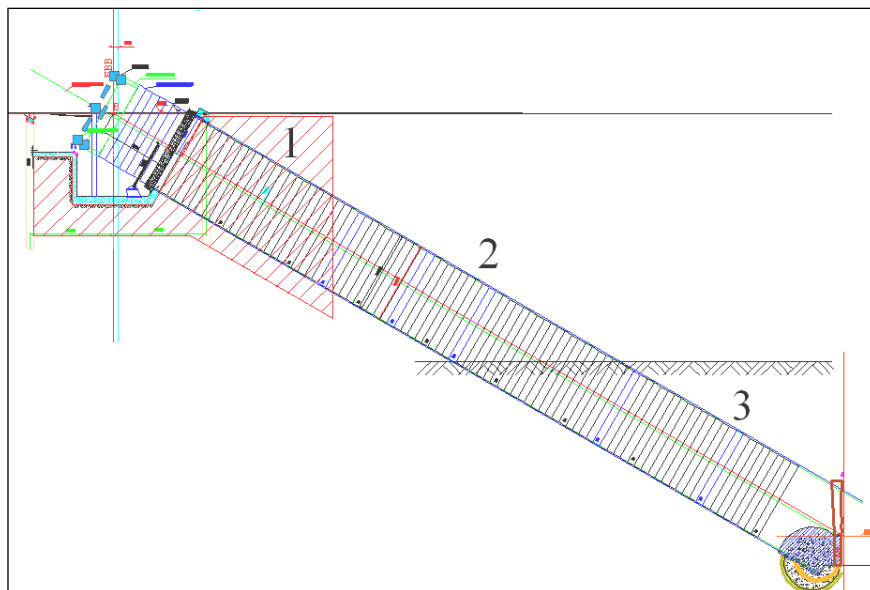


Рис. 4. Условное разделение массива на участки при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Спасская» (согласно интенсивности оседаний)

2. Зона наибольших оседаний располагается после выхода проходческого комплекса из зоны грунтозакрепления в слой слабых четвертичных отложений до границы с протерозойскими глинами. Зона характеризуется наибольшими оседаниями в шельге свода и значительными вертикальными сдвигами на поверхности.

3. Зона затухания оседаний, когда ТПК входит в слои прочных глин, которые характеризуются высокими значениями деформационных и прочностных характеристик (значения модуля общей деформации этих слоев в десятки раз

превышают соответствующие значения для четвертичных пород).

Участок 2, несмотря на относительное заглубление, характеризуется проявлением наибольших оседаний на поверхности. Для снижения вредного влияния процесса сдвигания на этом участке предложено дополнительное закрепление методом струйной цементации не только площадки вблизи устья тоннеля (участок 1), но и в глубине массива до прочных глин (участок 2), причем предлагается обеспечивать закрепление грунтов, не затрагивая приповерхностную зону (рис. 5).

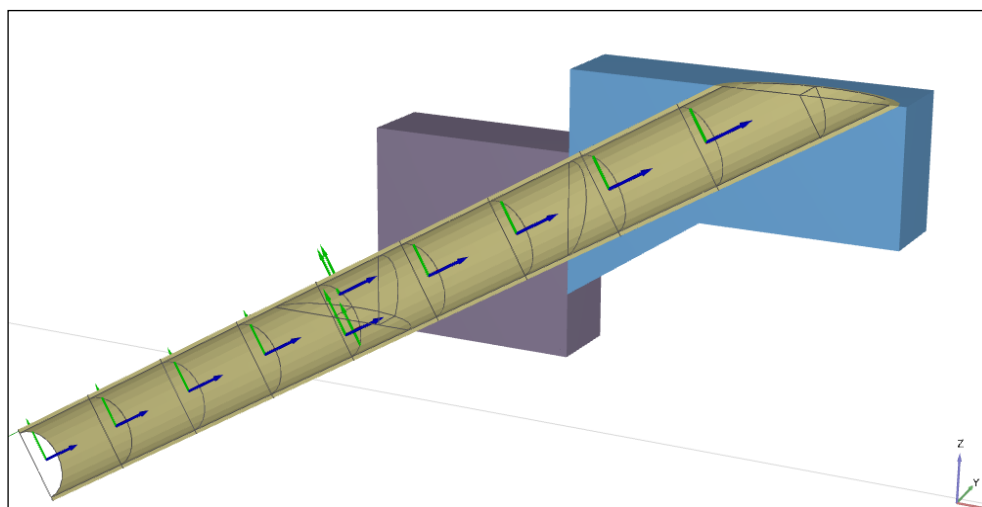


Рис. 5. Модель эскалаторного тоннеля станции метро «Спасская» с закреплением средней зоны массива



# СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

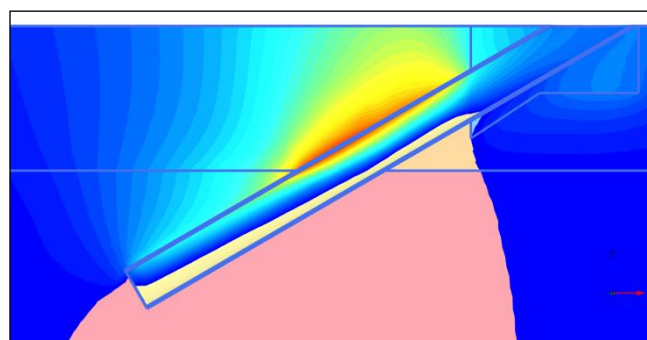
Такой подход не только улучшит показатели механической работы массива вблизи тоннеля, но и обеспечит минимизацию влияния работ по струйной цементации на земную поверхность. «Защитная» приповерхностная толща позволит снизить проявление «пучения» на поверхности, зачастую сопровождающее данный вид работ.

Для анализа эффективности предложенного способа был использован метод пространственного геомеханического моделирования, реализованный в программном комплексе Plaxis 3D. Данный программный продукт хорошо зарекомендовал себя в геотехнических расчетах и активно применяется во всем мире.

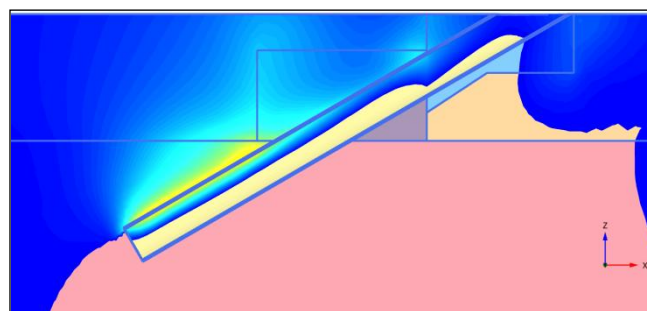
Построенная модель (см. рис. 5) включала реализуемый в настоящее время способ укрепления пород (участок 1), предлагаемый к закреплению участок массива, обделку тоннеля, возводимую постадийно. Модуль общей деформации указанных участков грунтозакрепления принят согласно данным испытаний на опытных участках и с учетом реальных физико-механических характеристик вмещающих тоннель горных пород. Значения модуля общей деформации проверены на ранее построенной модели проходки эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская» и приняты на разных моделях в интервале 200–500 МПа.

Анализ результатов проведенных расчетов показывает, насколько эффективным может быть применение дополнительного грунтозакрепления участка 2. На рис. 6, *a* видно, что основная часть оседаний реализуется в пределах вышеописанной зоны. Как и следовало ожидать, в зоне дополнительного закрепления оседания существенно сокращаются, остаточная часть оседаний расположена в зоне 3. Результаты расчетов показывают, что оседания на поверхности можно снизить в 2-3 раза по сравнению с исходным вариантом проходки (рисунок 6,б).

Кроме изменения величины оседаний, следует отметить изменение характера распределения вертикальных сдвижений на поверхности. Максимумы оседаний здесь



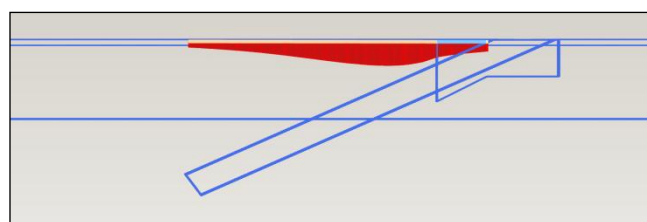
*a*



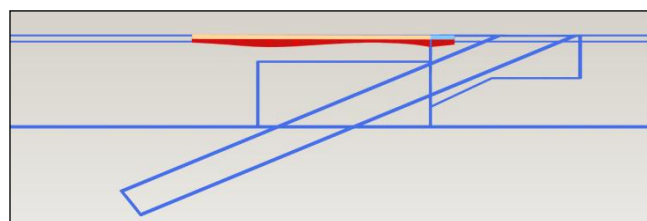
*б*

Рис. 6. Распределение вертикальных сдвижений (оседаний) при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Спасская»:

*a* – без дополнительной зоны закрепления грунта  
*б* – с применением дополнительного грунтозакрепления четвертичных пород



*a*



*б*

Рис. 7. Муфта сдвижения при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Спасская»:

*a* – без дополнительной зоны закрепления грунта  
*б* – с применением дополнительного грунтозакрепления четвертичных пород



локализуются в районе вертикальных проекций границ зоны закрепления, что связано с относительной активацией сдвижений в районе этих границ (рис. 7).

Проведенные исследования позволили сформулировать ряд выводов.

Технология проходки эскалаторных тоннелей ТПМК с активным пригрузом забоя позволяет существенно снизить вредное влияние горных работ на подрабатываемые здания и сооружения.

Как показала практика, несмотря на применение целого спектра новых технологических решений в ТПМК, полностью исключить возникновение и развитие сдвижений и деформаций пород в породном массиве и на земной поверхности не удается.

Наибольшие сдвигения на поверхности проявляются над верхней частью эскалаторного тоннеля, где глубина заложения этой наклонной выработки еще невелика, а вмещающие породы обводнены и неустойчивы. В нижней части тоннеля, после входа в коренные породы, деформационные процессы практически не проявляются.

Технология закрепления грунтов методом струйной цементации в устьевой части эскалаторного тоннеля позволяет обеспечить существенное снижение сдвижений и деформаций на поверхности при проходке, что подтверждается данными натурных измерений и математического моделирования сдвижений. Значения оседаний поверхности в пределах зоны цементации исчисляются первыми миллиметрами.

Положительный эффект применения струйной цементации грунтов, проявляющийся в значительном увеличении значений деформационных и прочностных характеристик грунтов и, соответственно, обеспечивающий снижение деформаций при проходке, может сойти на нет в связи с большими пучениями поверхности в момент производства работ по цементации под большим давлением.

В работе предлагается использовать дополнительное укрепление грунтов в более заглубленной части тоннеля вплоть до коренных пород, причем только в заглубленной зоне тоннеля без цементации

верхней толщи. Такое закрепление, как показали результаты модельных расчетов, может существенно снизить основные оседания над тоннелем и обеспечить минимизацию вредного влияния самих работ по струйной цементации.

## Библиографический список

1. Новоженин, С. Ю. Прогноз сдвижений и деформаций горных пород при сооружении эскалаторных тоннелей метрополитена тоннелепроходческими механизированными комплексами: дисс. канд. техн. наук: 25.00.16 / Новоженин Сергей Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2014. – 147 с.
2. Lunardi, P. Ground improvement by means of jet-grouting, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 1997, vol. 1(2), pp. 65-85.
3. Mitchell, J. K. (1981), Soil improvement—State of the art report, Proceedings of the 10th ICSMFE, Stockholm, 4, pp. 509–565.
4. Moseley M. P., Kirsch K. (ed.). Ground improvement. – CRC Press, 2004.
5. Малинин, А. Г. Струйная цементация грунтов: монография / А. Г. Малинин. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 168 с.
6. Burke G. K. Jet grouting systems: advantages and disadvantages //GeoSupport 2004: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry. – 2004.
7. Miki, G. and Nakanishi, W. (1984), Technical progress of the jet grouting method and its newest type, Proceedings of the International Conference on In-situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, pp. 195-200.
8. Hamidi B. et al. The Application of Jet Grouting for the Construction of Sydney International Airport Runway End Safety Area //Australian Geomechanics. – 2010. – Т. 45. – №. 4. – С. 21.
9. Tornaghi, R. and Cippo, A. P. (1985), Soil improvement by jet grouting for the solution of tunneling problems, Proceedings of the 4th International Symposium Tunnelling '85, Brighton, England, Institution of Mining and Metallurgy, British Tunnelling Society, and the Transport and Road Research Laboratory, Dept. of Transport, pp. 265-276.
10. Маслак, В. А. Геотехнический мониторинг при щитовой проходке наклонного тоннеля санкт-петербургского метрополитена [Текст] / В. А. Маслак [и др.] // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2010. – Вып.2. – С. 152–159.



# СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2016, № 1, pp. 67–72

<b>Title:</b>	Evaluation of jet grouting efficiency as means of minimizing of the harmful effect of escalator tunnel construction
<b>Author 1</b>	Name&Surname: <b>Volohov E.M.</b> Company: <b>National mineral resources university (Mining university)</b> Work Position: <b>associate professor</b> Scientific Degree: Contacts: <b>volohov@spmi.ru</b>
<b>Author 2</b>	Name&Surname: <b>Novozhenin S.U.</b> Company: <b>National mineral resources university (Mining university)</b> Work Position: <b>assistant lecturer</b> Contacts: <b>snovx@mail.ru</b>
<b>Abstract:</b>	<p>The article describes the escalator tunnel construction using tunnel boring machines in St. Petersburg. To reduce the harmful effects of underground construction on the Earth's surface in the mouth of the tunnel technology is used jet grouting rock mass. Based on the analysis of field data of the earth surface subsidence and rock strata proved the effectiveness of the jet grouting technology. Subsidence of the surface and within the grouting area, are approximately null.</p> <p>The fact that the development of subsidence occurs mainly outside the zone of jet grouting soil is shown. A method of reducing subsidence by grouting additional unstable rocks in the massif, which will reduce the harmful effects of underground construction for an massif and the earth's surface, is offered. To assess the efficiency of the proposed method, a numerical modeling based on the finite element method is carried out. According to the modeling results it is revealed that the proposed method will reduce the subsidence at the surface by 2-3 times.</p>
<b>Keywords:</b>	displacements and deformations, escalator tunnel, jet grouting, the data of field observations, modeling, finite element method.
<b>References:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Novozhenin, S. Ju. Prognoz sdvizenij i deformacij gornyh porod pri sooruzhenii jeskalatornyh tonnelej metropolitena tonneleprohodcheskimi mehanizirovannymi kompleksami [<i>Prediction of displacement and deformation of rocks in the construction of metro escalator tunnels tunnel boring mechanized complexes</i>]: diss. kand. tehn. nauk: 25.00.16 / Novozhenin Sergej Jur'evich. – Sankt-Peterburg, 2014. – 147 p.</li> <li>Lunardi. P. Ground improvement by means of jet-grouting, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 1997, vol. 1(2), pp. 65-85.</li> <li>Mitchell, J. K. (1981), Soil improvement—State of the art report, Proceedings of the 10th ICSMFE, Stockholm, 4, pp. 509–565.</li> <li>Moseley M. P., Kirsch K. (ed.). Ground improvement. – CRC Press, 2004.</li> <li>Malinin, A. G. Strujnaja cementacija gruntov [<i>Jet grouting soil</i>]: monograph/ A. G. Malinin. – Perm: Presstime, 2007. – 168 p.</li> <li>Burke G. K. Jet grouting systems: advantages and disadvantages //GeoSupport 2004: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry. – 2004.</li> <li>Miki, G. and Nakanishi, W. (1984), Technical progress of the jet grouting method and its newest type, Proceedings of the International Conference on In-situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, pp. 195-200.</li> <li>Hamidi B. et al. The Application of Jet Grouting for the Construction of Sydney International Airport Runway End Safety Area //Australian Geomechanics. – 2010. – T. 45. – №. 4. – C. 21.</li> <li>Tornaghi, R. and Cippo, A. P. (1985), Soil improvement by jet grouting for the solution of tunneling problems, Proceedings of the 4th International Symposium Tunnelling '85, Brighton, England, Institution of Mining and Metallurgy, British Tunnelling Society, and the Transport and Road Research Laboratory, Dept. of Transport, pp. 265-276.</li> <li>Maslak, V. A. Geotehnicheskij monitoring pri shhitovoj prohodke naklonnogo tonnelja sankt-peterburgskogo metropolitena [<i>Geotechnical monitoring during shield tunneling sloping tunnel of the St. Petersburg metro</i>] Izvestija TulGU. Nauki o Zemle. – 2010. – Vyp.2. – P. 152–159.</li> </ol>

