

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/69SAVN224.pdf>

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Страданченко, С. Г. Особенности деформирования грунтового массива при строительстве подземных сооружений с применением защитных экранов / С. Г. Страданченко, М. Д. Молев, В. А. Дмитриенко // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/69SAVN224.pdf>

For citation:

Stradanchenko S.G., Molev M.D., Dmitrienko V.A. Peculiarities of deformation of the soil massif during Construction of underground structures with the use of protective screens. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 69SAVN224. Available at: <https://esj.today/PDF/69SAVN224.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Страданченко Сергей Георгиевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Шахты, Россия
Директор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: stradanchenko@sssu.ru

Молев Михаил Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Шахты, Россия
Профессор кафедры «Строительство и техносферная безопасность»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: mikhail.molew@yandex.ru

Дмитриенко Владимир Александрович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Шахты, Россия
Доцент кафедры «Строительство и техносферная безопасность»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: VADmitrienko@rambler.ru

Особенности деформирования грунтового массива при строительстве подземных сооружений с применением защитных экранов

Аннотация. Наблюдающаяся в последние годы тенденция роста объёмов подземного строительства для размещения различных инфраструктурных объектов часто сопровождается негативными проявлениями, поскольку в большинстве случаев такие сооружения возводятся в грунтовых массивах. Сложное напряженно-деформированное состояние вмещающего массива при строительстве подземных сооружений в грунтах часто сопровождается вывалами породы и смещениями дневной поверхности, о чём свидетельствуют неоднократные аварии в забоях выработок и провалы поверхности в зонах ведения горных работ. В статье обоснована возможность исследования поведения приконтурного массива в зоне обнажения грунта путём моделирования методом конечных элементов. Исследовано напряжённно-деформированное состояние грунтового массива в забойной части строящейся выработки. Показана целесообразность и необходимость применения упрочнения свода подземных сооружений путём формирования защитного экрана из зацементированных в массиве стальных труб в кровле выработок. Отмечена низкая эффективность работы коротких экранов, менее 15 м, так как в этом случае большая их часть располагается в деформируемой области, то есть забойная часть труб экрана должна располагаться за пределами призмы сползания в выработке.

Установлена зона максимальных смещений на забое выработок, которая может быть компенсирована установкой грунтовых полимерных анкеров, расположенных параллельно оси выработки. При их наклонном расположении с закреплением в почве, эффективность закрепления значительно снижается. Отмечена необходимость заземления устьевого части экрана как минимум на трёх рамах крепи выработки. При оценке влияния механических характеристик грунта на деформации выявлено значительное влияние угла внутреннего трения на смещения забоя.

Ключевые слова: подземные сооружения; грунтовый массив; упрочнение; грунтовые анкера; метод конечных элементов; моделирование; смещения; напряжения

Введение

В современном мире развитие крупных городов невозможно без развития инфраструктурных объектов. Однако плотная застройка, отсутствие свободных площадей и устаревшие эксплуатируемые объекты, не позволяют в полной мере решать эту задачу. Поэтому и в настоящее время и в ближайшей перспективе развитие транспортных и инженерных коммуникаций в черте больших городов и особенно в их центральной части, будет связано со строительством подземных объектов горным способом.

Рост объемов строительства подземных сооружений сопровождается возникновением сложных геомеханических проблем, поскольку строительство подземных объектов в условиях городской застройки приводит к смещениям грунта, изменениям рельефа и снижению устойчивости массивов [1–3]. Несмотря на сложность возникающих задач необходимо минимизировать объемы строительно-монтажных работ без ухудшения несущей способности объектов городской инфраструктуры. Для этого на стадии проектирования надо иметь возможность адекватно оценивать напряженно-деформированное состояния (НДС) геосреды [4; 5], с целью снижения влияния на существующие объекты, расположенные на поверхности земли.

Как правило, строительство подземных сооружений производится в грунтах, то есть в весьма сложной по строению, различающейся по механическим свойствам и законам деформирования среде. Условия формирования, расположение слоёв, неоднородность структуры и влияние рядом расположенных других объектов, оказывают существенное влияние на НДС грунтовых массивов. Поэтому, несмотря на огромные масштабы и опыт ведения горных работ, проектирование подземных объектов на основе законов геомеханики является сложнейшей задачей [6–8].

Наиболее частыми причинами оседаний и провалов дорожных покрытий и земельных участков, помимо оттаивания почвы в весеннее время, являются аварии на устаревших и изношенных коммуникациях водо- и теплоснабжения (особенно это касается исторической части города), а также инженерные и технологические ошибки при строительстве новых сооружений и прокладке автотрасс [1; 9].

В настоящее время наибольшие объёмы строительства тоннелей осуществляются с применением высокомеханизированных тоннелепроходческих щитовых комплексов. При щитовом способе проходки все операции проходческого цикла выполняются под защитой оболочки щита, что позволяет обеспечить максимальную защиту рабочих от обрушения пород. Однако для размещения щита требуется пространство, которое по длине может достигать несколько десятков метров, поэтому щиты применяются при строительстве протяжённых выработок. В этом случае для ввода в тоннель и вывода из него возводят монтажные и демонтажные камеры. Кроме этого, в станционном комплексе метрополитена имеется целый ряд выработок небольшой длины, различной формы сечения и сложной траектории, в которых

применять щиты нерационально. Следовательно, их проходка осуществляется в несколько этапов с применением временной крепи и зачастую с ручной разработкой породного массива.

Анализ технологий проведения и крепления подземных сооружений показывает, что даже применение механизированных щитов в полной мере не исключает деформации поверхности, особенно если проходка осуществляется на небольшой глубине. Ситуация значительно усугубляется при строительстве в грунтах объектов небольшой протяжённости или сложной конфигурации горным способом, так как в этом случае строительство выработок не исключает значительных деформаций массива и даже обрушений. Это обусловлено возведением подземных объектов в несколько этапов с временной крепью. Такая технология сопряжена с наличием зазора между контуром грунта и крепью. При этом смещения стенок выработок формируют зоны концентрации напряжений, которые могут провоцировать обрушения пород и соответственно деформации поверхности. Об этом свидетельствует целый ряд инцидентов с обрушением породы на строящихся станциях метро «Суворовская» и «Лианозово» в Москве, а также провалами грунта на Ленинградском шоссе и на улице Остряковская около станции метро «Аэропорт».

Таким образом, несмотря на высокий уровень механизации строительства тоннелей, в настоящее время существующие технологии строительства в грунтах подземных сооружений небольшой протяженности с возведением временной крепи требуют длительного пребывания рабочих в незакрепленной зоне и характеризуются очень большими затратами ручного труда и высокой опасностью травмирования рабочих.

Для повышения устойчивости контура горных выработок разработано много способов и средств. Однако в грунтовых массивах эффективность их применения не всегда достигается, что требует совершенствования технологии упрочнения с точки зрения снижения деформаций забойной зоны.

В последние годы, при строительстве подземных сооружений в неустойчивых грунтах, упрочнение пород свода часто осуществляется путём формирования защитного экрана из стальных труб диаметром 100–120 мм, замоноличенных цементным раствором в скважинах, пробуренных за контуром горных выработок. При этом бурение скважин осуществляется из выработки под углом наклона 3–6 градусов к её оси. Такие экраны длиной до 15–18 м формируются через каждые 7–9 м по длине выработки, обеспечивая тем самым их перекрытие.

Такая технология обеспечивает устойчивость свода сооружения, однако напряжения от экрана передаются на нетронутый массив впереди забоя и вызывают его деформирование. Поэтому массив грунта, для предотвращения обрушения лба забоя выработки, после нанесения на поверхность набрызгбетона, упрочняется анкерами с сердечниками из стекловолоконных трубок, которые забиваются в скважины диаметром 100 мм, а затем под давлением замоноличиваются цементным раствором. Анкеры длиной до 12 м устанавливаются параллельно оси выработки. Грунтовый массив после набора проектной прочности раствором в скважинах, разрушается ковшом экскаватора вместе с анкерами при выемке породы.

Этот вариант упрочнения прохождения неустойчивых зон широко применяется за рубежом и использован при строительстве автодорожных тоннелей в г. Сочи (рис. 1). Однако несмотря на положительный опыт применения этой технологии имели место частые и достаточно серьёзные осложнения, потребовавшие больших затрат на их устранение.

Это обстоятельство определило цель исследований — установить эффективную схему работы анкеров защитного экрана и определить рациональные параметры упрочнения приконтурного породного массива.

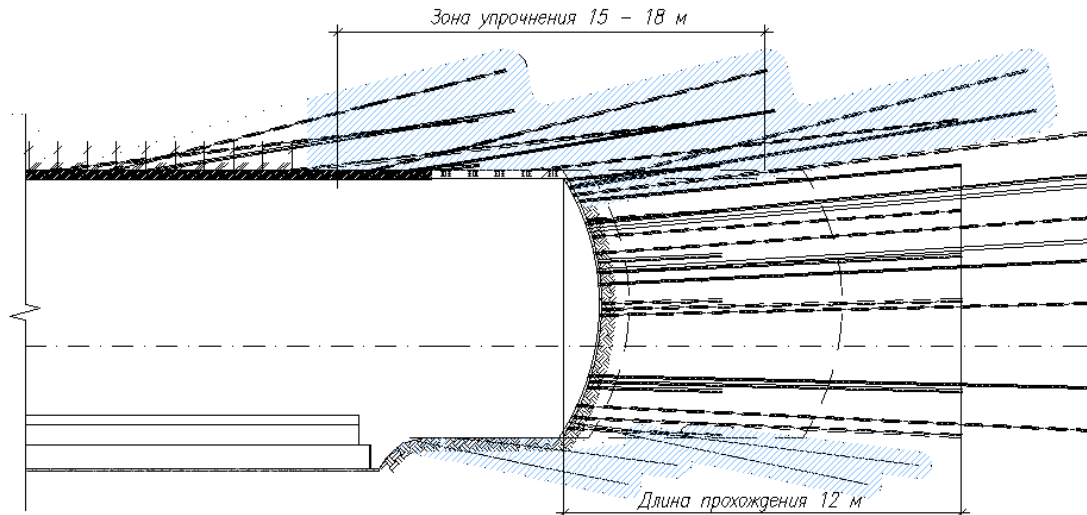


Рисунок 1. Технология упрочнения пород в зонах нарушений при строительстве тоннеля № 8 дублёра Курортного проспекта г. Сочи (рисунок из проекта строительства тоннеля № 8)

Методы

В качестве метода исследования принято моделирование методом конечных элементов (МКЭ), так как он наиболее часто используется для решения геотехнических задач [10–12]. Также имеется ряд доступных программных комплексов, хорошо зарекомендовавших себя при выполнении исследований [12; 13]. Поскольку на данном этапе исследований поставлена задача оценки эффективности работы труб защитного экрана, то наиболее просто она решается в плоской постановке с сечением выработки по продольной оси.

Чаще всего в инженерной практике при оценке НДС приконтурного массива грунта используется модель линейно-деформируемой среды на основе теории Кулона-Мора. Поскольку вслед за разгрузкой при выемке породы всегда следует повторное нагружение из-за сопротивления крепи, то целесообразно применение упруго-пластической модели массива.

При моделировании с целью максимального приближения моделей к реальным условиям прохождения выработок геометрические параметры и характеристики грунтов вмещающего массива приняты по условиям строительства монтажной камеры №1 Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена на участке от ст. Парк Победы до ст. Раменки.

Моделированием МКЭ с использованием программы «Plaxis» проведена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород в зоне забоя.

В результате установлено, что впереди забоя формируется призма сползания, которая может привести к его обрушению. Анализ моделей даже с небольшой глубиной заложения выработок показал, что расстояние до плоскости скольжения призмы на уровне свода выработки превышает её высоту, а наибольшие смещения наблюдаются в нижней части плоскости забоя (рис. 2).

Кроме этого, наблюдаются значительные деформации поверхности модели. При высоте слоя грунта над сводом выработки более 10 м выполнить расчёт невозможно из-за разрушения моделей. Таким образом, можно отметить, что для предотвращения смещений грунтовых обнажений обязательно требуется упрочнение пород.

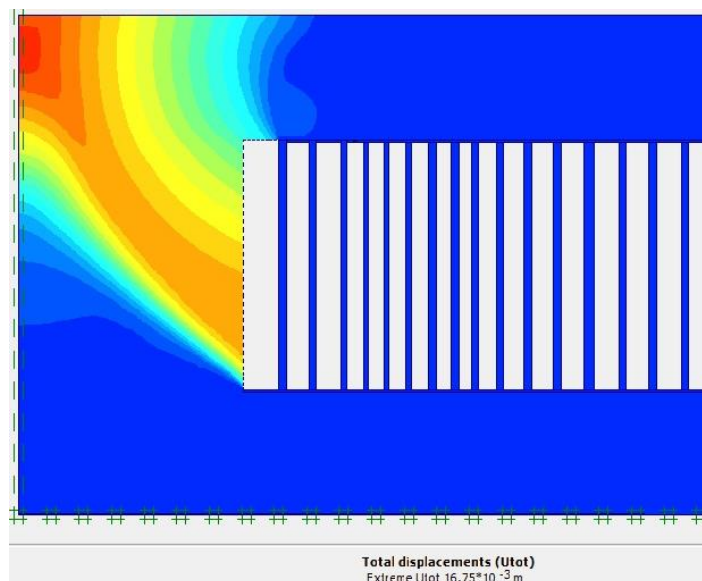


Рисунок 2. Формирование призмы сползания в забое выработки (скрин авторов)

Формирование защитного экрана осуществлялось введением в модель стальных труб $\varnothing 114$ мм и длиной 18 м, с их установкой в кровле и углом наклона 4° к оси выработки. Перекрытие новой заходки экрана ранее установленным принято 6 м (рис. 3).

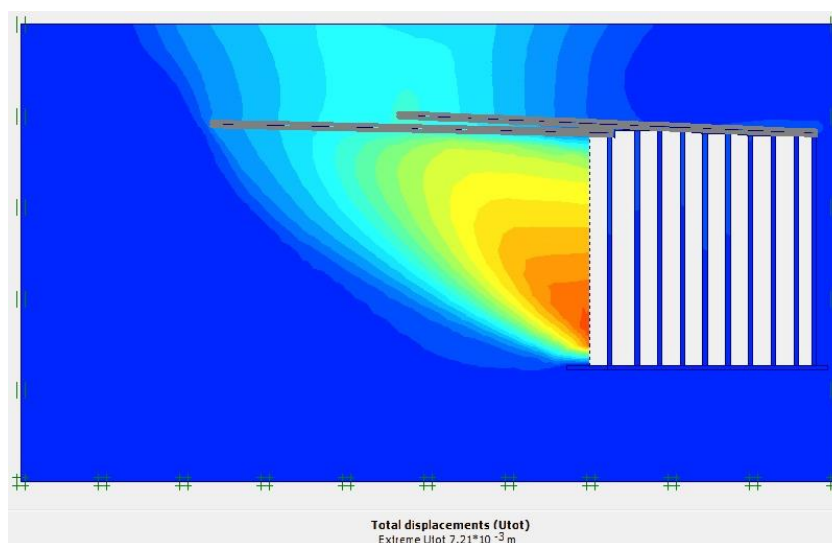


Рисунок 3. Распределение смещений забойной зоны выработки под защитой экрана (скрин авторов)

В результате расчёта моделей с высотой грунта над сводом крепи 5,0 м, максимальные смещения забоя снизились до 7,2 мм, что более чем в 2 раза меньше чем в модели без экрана.

Результаты

Чтобы расширить область исследований по глубине и предотвратить разрушение моделей было принято решение в зоне максимальных смещений смоделировать установку пластиковых грунтовых анкеров. Вначале выполнен расчёт моделей с анкерами, расположенными параллельно оси выработки (рис. 4). Это позволило сократить деформации до 3,94 мм, то есть ещё почти в 2 раза.

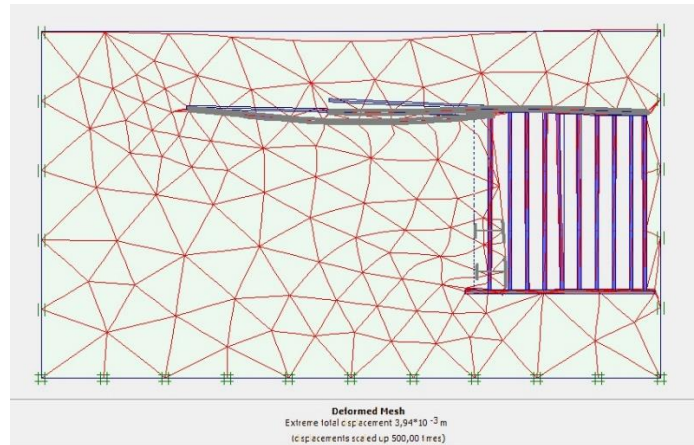


Рисунок 4. Деформационная схема выработки с закреплением забоя анкерами параллельными оси выработки (скрин авторов)

Вместе с тем наблюдается снижение угла наклона плоскости скольжения грунта и соответственно увеличивается размер призмы сползания. Это требует увеличения длины стеклопластиковых анкеров для надёжного закрепления забоя. С целью уменьшения длины анкеров рассмотрена возможность их наклонной установки с заделкой в почве выработки (рис. 5). Анализ полученных результатов позволяет отметить, что эффективность работы анкеров в этом случае резко снижается, так как смещения забоя увеличиваются до 19,5 мм.

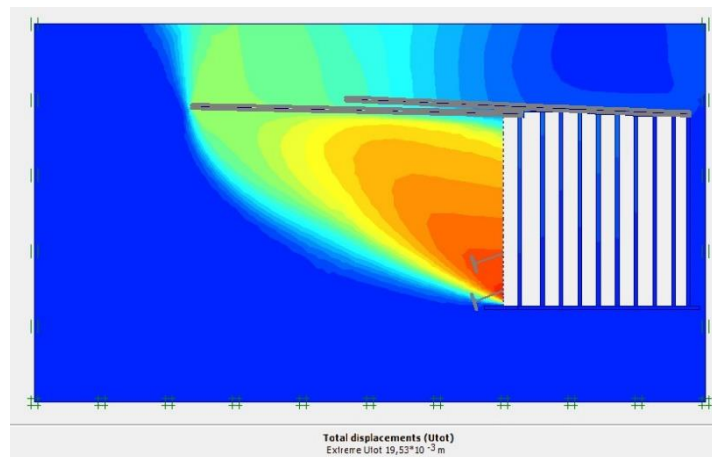


Рисунок 5. Распределение смещений забойной зоны выработки при закреплении забоя наклонными анкерами (скрин авторов)

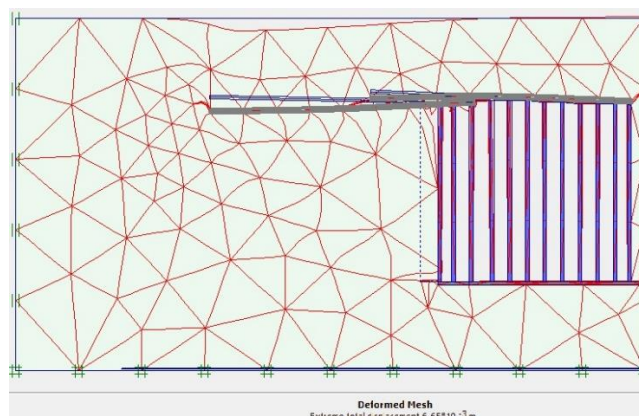


Рисунок 6. Деформационная схема модели с опиранием труб экрана на три рамы (скрин авторов)

Следует также отметить влияние схемы опирания труб экрана на крепь. При опирании труб экрана на три рамы (рис. 6) их концы в определённой степени защемлены между рамами крепи и грунтовым массивом, а на другой модели (рис. 5), с опиранием на одну раму возможен свободный поворот. Это сопровождается снижением деформаций забоя до 6,8 мм даже при увеличении глубины заложения выработки.

В процессе анализа результатов моделирования выявлено ещё одно важное обстоятельство. По мере подвигания забоя и смещения границы призмы сползания зона опирания защитного экрана смещается на призму сползания, что приводит к резкому увеличению смещений.

Немаловажную роль в формировании НДС подземных сооружений играют физико-механические характеристики грунтов. Выполненные на данный момент исследования показывают значительный рост нормальных напряжений (рис. 7) и соответственно увеличение смещений забоя выработки (рис. 8) при уменьшении угла внутреннего трения грунта.

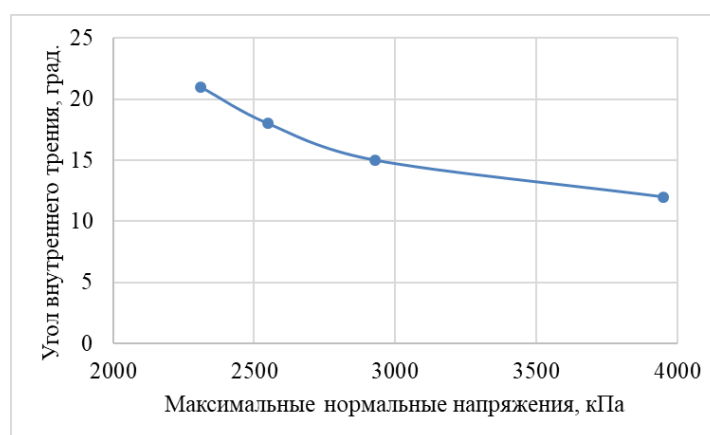


Рисунок 7. Зависимость максимальных нормальных напряжений в почве выработки от угла внутреннего трения грунта (составлено авторами на основании выполненных расчётов)

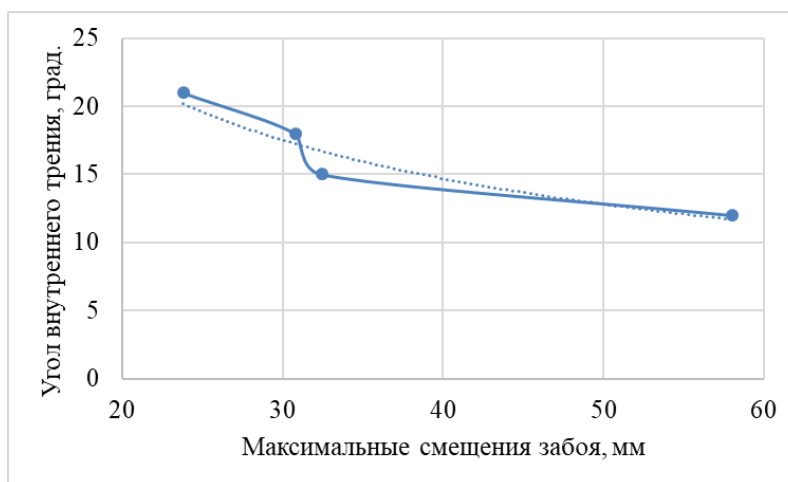


Рисунок 8. Зависимость максимальных смещений забоя выработки от угла внутреннего трения грунта (составлено авторами на основании выполненных расчётов)

Обсуждение

При строительстве заглубленных сооружений в грунтах формирующаяся впереди забоя призма сползания снижает несущую способность защитного экрана в кровле выработки. Поэтому для эффективной работы длина труб при устройстве экрана должна как минимум в

два раза превышать высоту выработки, то есть забойная часть экрана должна выходить за пределы призмы сползания.

При высоте выработки в модели 10 м и физико-механических характеристиках грунта характерных для демонтажной камеры №1 Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена смещения в выработке без экрана, достигают предельных значений при высоте слоя грунта над сводом выработки немногим более 10 м.

На моделях с защитным экраном наибольшие смещения наблюдаются в нижней части забоя.

Снижение смещений забоя достигается установкой грунтовых анкеров в зоне максимальных смещений. Анкеры должны устанавливаться параллельно оси выработки. Наклонное расположение с заделкой замковой части анкеров в почве выработки не обеспечивает снижения смещений.

При оценке влияния механических характеристик связных грунтов отмечено увеличение смещений забоя при снижении величины угла внутреннего трения. Существенного влияния коэффициента сцепления на устойчивость забоя на данном этапе исследований не установлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теличенко, В.И. Критические технологии в строительстве / В.И. Теличенко. — Текст: непосредственный // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. — 1999. — № 1. — С. 29.
2. Карасев, М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей / М.А. Карасев. — Текст: электронный // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 163–170. — URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/6443/4351> (дата обращения: 21.12.2023).
3. Хан, Г.Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости / Г.Н. Хан. — Текст: электронный // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 109–114. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_9947396_34609048.pdf (дата обращения: 21.12.2023).
4. Павленко А.М. Предотвращение сдвижений дневной поверхности при проходке тоннеля большого диаметра / А.М. Павленко. — Текст: электронный // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 9. — С. 170–173. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15545390_84195840.pdf (дата обращения: 21.12.2023).
5. Куликова, Е.Ю. Выработка критериев экологической безопасности применения технологий и способов строительства коммунальных подземных сооружений / Е.Ю. Куликова. — Текст: электронный // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 1. — С. 49–52. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15201854_37365243.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

6. Фриштер, Л.Ю. Сопоставление возможностей численного и экспериментального моделирования напряжённо-деформированного состояния конструкций с учётом их геометрической нелинейности / Л.Ю. Фриштер, М.Л. Мозгалева. — Текст: непосредственный // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2010. — Т. 6. — № 1-2. — С. 221–222.
7. Namazi, E. Ground behaviour around a tunnel using various soil models / E. Namazi, H. Mohamad, A. Hong, M. Hajihassani, S. Jusoh, S. Abad. — Текст: электронный // Electronic Journal Geotechnics Engineering (EJGE). — 2012. — № 17. — P. 609–621. — URL: https://www.researchgate.net/publication/261368027_Ground_Behaviour_Around_a_Tunnel_Using_Various_Soil_Models (дата обращения: 21.12.2023).
8. Yanzhi, Y. Three-dimensional orthotropic equivalent modelling method of large-scale circular jointed lining / Y. Yanzhi, Z. Weiwei, W. Jianwei, Y. Zhihao. — DOI: 10.1016/j.tust.2014.07.002. — Текст: непосредственный // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2014. — № 44. — P. 33–41.
9. Прокопов, А.Ю. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань / А.Ю. Прокопов, В.Ф. Акопян, К.Н. Гаптлисламова — Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. — С. 1–6 — URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2104> (дата обращения: 21.12.2023).
10. Соколов, М.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований на основе компьютерного моделирования / М.В. Соколов, С.М. Простов, А.В. Покатилов. — Текст: электронный // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы X международной научно-практической конференции / Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; ответственный редактор В.Ю. Блюменштейн; заместитель ответственного редактора Л.А. Шевченко. — Кемерово: КузГТУ, 2013. — С. 396–399. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22424531_48817117.pdf (дата обращения: 21.12.2023).
11. Дивеев, А.И. Метод конечных элементов для математического моделирования напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов / А.И. Дивеев, А.И. Фесечко. — Текст: электронный // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. — 2009. — № 11. — С. 112–122. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15248719_89080636.pdf (дата обращения: 21.12.2023).
12. Фадеев, А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «Plaxis» / А.Б. Фадеев. — Текст: электронный // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей международной научно-технической конференции / Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет; под общей редакцией Р.А. Мангушева. — Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. — С. 13–20. — URL: <https://geoconf2019.spbgasu.ru/wp-content/uploads/2018/10/2012.pdf> (дата обращения: 21.12.2023).

13. Chernysheva, N. Modified finite element analysis for exterior boundary problems in infinite medium / N. Chernysheva, L. Rozin. — DOI: 10.1051/matecconf/20165301042. — Текст: электронный // Week of Science in SPbPU — Civil Engineering: International Scientific Conference materials / MATEC Web of Conferences — 2016. — Vol. 53. — P. 1–6. — URL: https://www.researchgate.net/publication/301329291_Modified_finite_element_analysis_for_exterior_boundary_problems_in_infinite_medium (дата обращения: 21.12.2023).

Stradanchenko Sergey Georgievich

Don State Technical University in the city of Shakhty, Shakhty, Russia
E-mail: stradanchenko@sssu.ru

Molev Mikhail Dmitrievich

Don State Technical University in the city of Shakhty, Shakhty, Russia
E-mail: mikhail.molew@yandex.ru

Dmitrienko Vladimir Aleksandrovich

Don State Technical University in the city of Shakhty, Shakhty, Russia
E-mail: VADmitrienko@rambler.ru

Peculiarities of deformation of the soil massif during Construction of underground structures with the use of protective screens

Abstract. The tendency of growth of underground construction volumes observed in recent years to accommodate various infrastructure facilities is often accompanied by negative manifestations, since in most cases such structures are erected in soil massifs. Rock falls and displacements of the day surface, as evidenced by repeated accidents in the faces of excavations and surface failures in mining areas often accompany the complex stress-strain state of the surrounding massif during construction of underground facilities in soils. The possibility of studying the behavior of the contour massif in the zone of soil exposure by finite element modeling was substantiated. The stress-strain state of the soil massif in the bottom-hole part of the excavation under construction has been investigated. The expediency and necessity of application of reinforcement of underground structures vault by formation of protective screen from steel pipes cemented in the massif in the roof of excavations is shown. The low efficiency of short screens, less than 15 meters, is noted, as in this case the most part of them is located in the deformed area. That is, the downhole part of the screen pipes should be located outside the prism of sliding in the excavation. The zone of maximum displacements at the face of the excavation has been established, which can be compensated by installing soil polymer anchors located parallel to the axis of the excavation. At their inclined location with anchoring in the soil, the anchoring efficiency is significantly reduced. The necessity of pinching the wellhead part of the screen on at least three frames of the excavation support was noted. When evaluating the influence of soil mechanical characteristics on deformations, a significant influence of the angle of internal friction on the bottom-hole displacements was revealed.

Keywords: underground structures; soil mass; strengthening; soil anchors; finite element method; modeling; displacements; stresses