DOI: *10.25515/PMI.2017.6.649*

УДК 622.831

О НАГРУЗКАХ ОТ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ ЗАКРЫТОГО СПОСОБА РАБОТ

К.П.БЕЗРОДНЫЙ, М.О.ЛЕБЕДЕВ
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены данные нормативных документов в части рекомендуемых методов расчета нагрузок на обделки тоннелей и результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния системы «обделка – горный массив», полученные при проведении геотехнических мониторингов во время сооружения тоннелей в различных инженерно-геологических условиях.

Основу нормативных документов в части расчета обделок тоннелей составляют рекомендации по использованию методов расчета на основе свода обрушения, но при этом никак не учитывается природное поле напряжений и деформативные характеристики грунтового массива, которые в значительной степени влияют на напряженно-деформированное состояние обделок и крепей. Как показывают результаты натурных исследований, проводимых в рамках геотехнических мониторингов при строительстве транспортных тоннелей с применением технологий, обеспечивающих исключение смещений лба забоя и контура тоннеля, сохраняется сплошность грунтового массива, чем исключается возможность сводообразования. Это касается и водонасыщенных четвертичных отложений при строительстве перегонных и эскалаторных тоннелей Петербургского метрополитена с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов с гидравлическим и грунтовым пригрузом забоя.

Во многих случаях строительства тоннелей различного назначения, где смещения грунтового массива не нарушают сплошности, следует вести расчеты крепей и обделок методами механики сплошной среды.

Ключевые слова: нормативные документы, горный массив, тоннели, нагрузки, геотехнический мониторинг, датчики, напряжения, расчеты

Как цитировать эту статью: Безродный К.П. О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ / К.П.Безродный, М.О.Лебедев // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 649-653. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649

Введение. Основу нормативных документов в части расчета обделок тоннелей составляют рекомендации по использованию методов расчета на основе свода обрушения (СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные», актуализированная редакция СНиП 32-04-97).

В неустойчивых грунтах, в которых сводообразование невозможно (водонасыщенные несвязные и слабые глинистые грунты), этими документами нагрузки на обделки предписывается принимать с учетом давления всей толщи грунтов над тоннельным сооружением.

Данные нормативные документы никак не учитывают природное поле напряжений и деформативные характеристики грунтового массива, которые в значительной степени влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) обделок и крепей. Как показывают результаты натурных исследований, проводимых в рамках геотехнических мониторингов [1, 3-7, 11, 12], при строительстве тоннелей с применением технологий, обеспечивающих исключение смещений лба забоя и контура тоннеля, сохраняется сплошность грунтового массива и не возникает сводообразование.

Это касается и водонасыщенных четвертичных отложений при строительстве перегонных и эскалаторных тоннелей Петербургского метрополитена с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) с гидравлическим и грунтовым пригрузом забоя. Исследования при строительстве железнодорожных тоннелей трассы БАМ в скальных грунтах, транспортных тоннелей по олимпийской трассе «Адлер – Горноклиматический курорт Альпика-Сервис», а также тоннелей Петербургского метрополитена, показали невозможность воздействия на обделку сводов обрушения [1, 6, 8].

В качестве примеров можно привести исследования НДС обделок ряда тоннелей в различных инженерно-геологических условиях.

Методика исследований. При изготовлении блоков железобетонной обделки на заводе либо при бетонировании (набрызгбетонировании) обделки непосредственно в тоннеле закладывали струнные датчики линейных деформаций.

С помощью струнных датчиков измеряют период (частоту) колебания струны в зависимости от ее натяжения, затем, зная тарировочные характеристики датчиков, определяют относительные деформации материала обделки. Для определения напряжений в бетонных (набрызгбетонных) конструкциях по измеренным деформациям разработана специальная методика, в том числе с учетом загружения бетона в раннем возрасте.

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.649*

Напряжение в бетоне в любой рассматриваемый момент с учетом ползучести бетона определяется по формуле

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)E(t) - \int_{t_0}^{t} K(t,\tau)\,\sigma(\tau),$$

где $E(t)$ – модуль упругости бетона в рассматриваемый момент t; $\varepsilon(t)$ – деформации в рассматриваемый момент; $\sigma(\tau)$ – напряжение упругой составляющей деформирования бетона; $K(t, \tau)$ – ядро ползучести

$$K(t,\tau) = E(t)(1/E(\tau) + c(t)),$$

$c(t)$ – мера ползучести бетона (см. таблицу).

Модуль упругости бетона тесно связан с ростом прочности при его нагружении в раннем возрасте (монолитные, набрызгбетонные крепи и обделки) и может быть определен при помощи аппроксимации:

$$E(t) = E_0(1 - \alpha_1 e^{-\beta_1\tau} - \alpha_2 e^{-\beta_2\tau}),$$

где E_0 – модуль упругости бетона; α_1, α_2, β_1, β_2 – параметры, подобранные по экспериментальным данным.

Зависимость меры ползучести бетона во времени от возраста загружения

Характеристика ползучести бетона							
Возраст загружения, сут	Мера ползучести бетона $c(t, t_1)\times10^{-5}$ МПа при длительности загружения (t, t_0), сут						
	10	25	50	100	200	500	1000
0,125	10	16	20	24	27	31	32
10	1.1	1,76	2.23	2,67	3,06	3,48	3,6
30	0,85	1,41	1,8	2,18	2,52	2,89	3
112	0,5	0,8	1.18	1,45	1,7	1,92	1,98
205	0,35	0,67	0,89	1,09	1,26	1,42	1,46
512	0,21	0,46	0,65	0,8	0,91	0,98	1

При расчете напряжений приняты следующие допущения:
- деформации и напряжения в арматуре связаны законом Гука;
- арматура деформируется совместно с бетоном;
- бетон представляет собой линейно-деформируемый упруго-ползучий материал;
- в пределах поперечного сечения бетон однороден по составу и возрасту;
- применяется гипотеза плоских сечений.

Сооружение перегонных тоннелей из сборной водонепроницаемой блочной железобетонной обделки наружным диаметром 7,6 м ТПМК с гидравлическим пригрузом забоя в совершенно неустойчивых водонасыщенных четвертичных отложениях при гидростатическом давлении до 0,5 МПа осуществлено между станциями «Лесная» и «Пл.Мужества» Петербургского метрополитена.

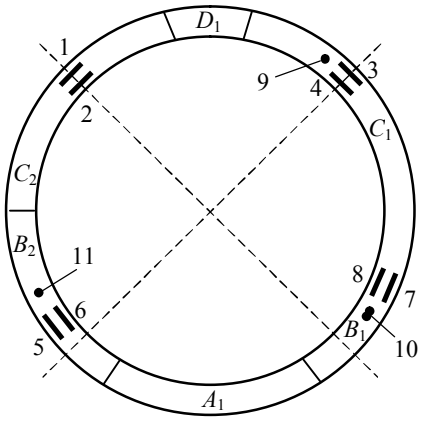


Рис.1. Схема установки датчиков в кольце (замковый блок в шелыге)

1-8 – датчики в тангенциальном направлении; 9-11 – датчики вдоль оси тоннеля

Исследование статических воздействий на тоннели в плоскости, перпендикулярной оси, осуществлялось с помощью струнных датчиков линейных деформаций бетона ПЛДС-400 (преобразователь линейных деформаций струнный с базой измерения 400 мм), установленных в теле бетона блоков обделки при их изготовлении.

В каждом из колец датчиками оснащены четыре блока: В1, В2, С1 и С2 (рис.1) и установлено 11 датчиков: 8 шт. – в направлении, перпендикулярном оси тоннеля, 3 шт. – в направлении продольном оси тоннеля.

Всего установлено десять колец с блоками, оснащенными датчиками.

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649

На рис.2 представлен график изменения напряжений в блоке С1 кольца № 308, он характерен для всех нормальных тангенциальных напряжений в исследуемых кольцах.

Наибольшее нормальное тангенциальных напряжений, зафиксированное в одной из точек опытного кольца № 420, составляет 25,8 МПа, что далеко от предела прочности при одноосном сжатии 65 МПа.

Во всех блоках, оснащенных датчиками, нормальные тангенциальные напряжения сжимающие.

В следующем примере представлены результаты исследований НДС обделки эскалаторного тоннеля ст. «Адмиралтейская» Петербургского метрополитена, сооружаемого в четвертичных водонасыщенных грунтах при помощи ТПМК с грунтовым пригрузом забоя.

На рис.3 представлен инженерно-геологический разрез с эскалаторным тоннелем, по трассе которого размещены кольца обделки, оснащенные датчиками. На рис.4 показана схема обделки со встроенными струнными датчиками для измерения нормальных тангенциальных напряжений и напряжений вдоль оси тоннеля. В качестве примера на рис.5 приведены графики формирования нормальных тангенциальных напряжений в одном из блоков обделки. Характерно, что во всех блоках, оснащенных датчиками, нормальные тангенциальные напряжения сжимающие с одинаковой тенденцией развития.

Следующий пример – строительство руддвора и венттоннеля от шахтного ствола в протерозойских глинах при строительстве Петербургского метрополитена. При проходке были применены опережающий забой – экран из труб и косвенное армирование грунтового массива фиберглассовыми инъекционными анкерами с жесткой арочно-бетонной крепью. Эти мероприятия свели практически к нулю смещения контура выработки.

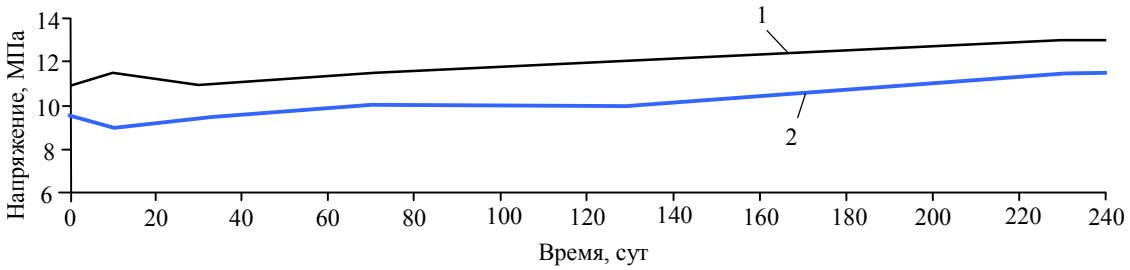


Рис.2. Развитие во времени напряжений в блоке С1 кольца 308 в тоннеле № 1

1 – датчик 3; 2 – датчик 4

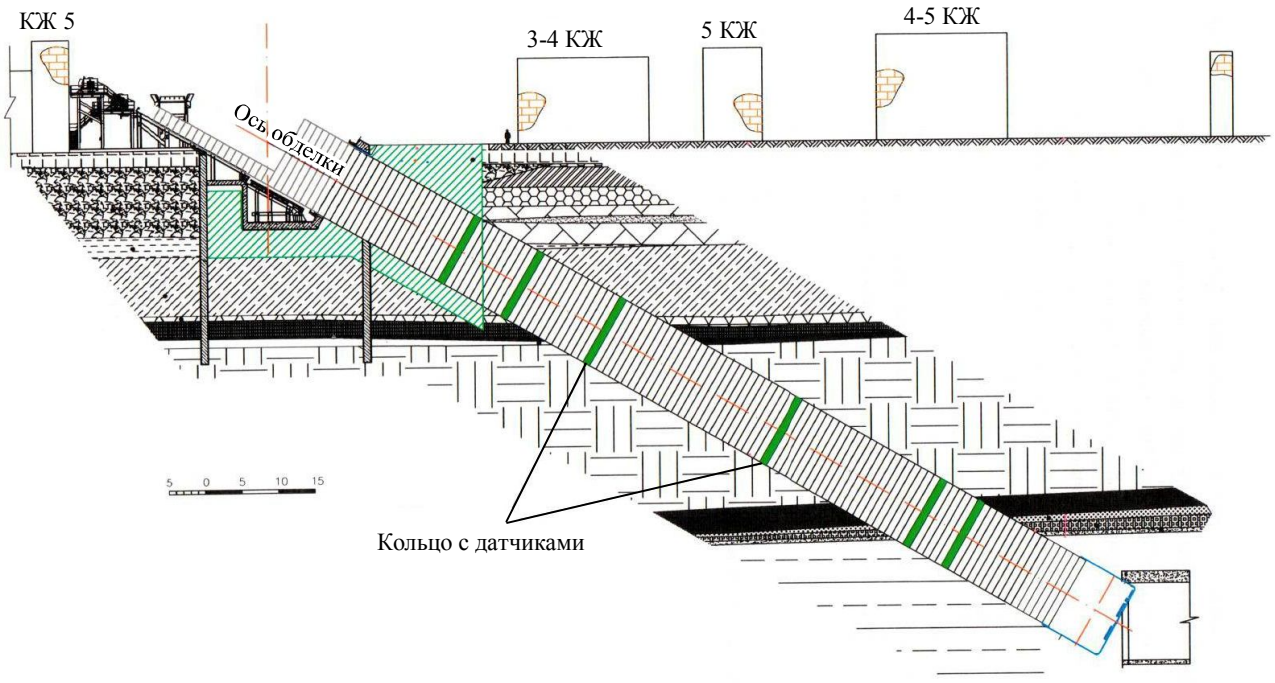


Рис.3. Расположение колец обделки с датчиками по трассе тоннеля

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.649*

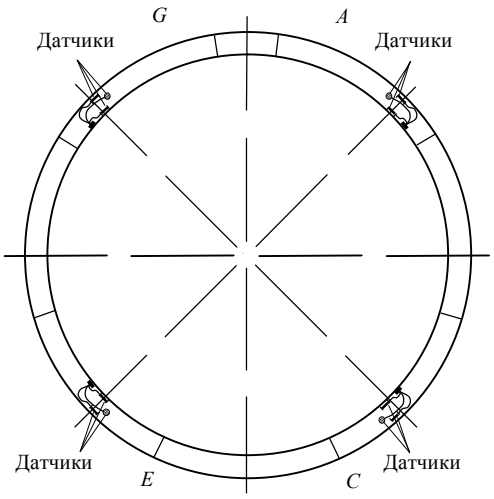


Рис.4. Схема размещения датчиков в обделке эскалаторного тоннеля

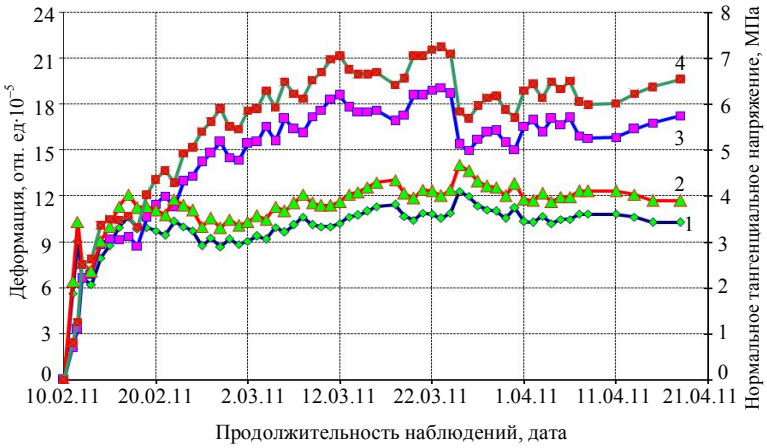


Рис.5. График формирования усилий в одном из блоков обделки на внешнем (1, 2) и внутреннем (3, 4) контуре

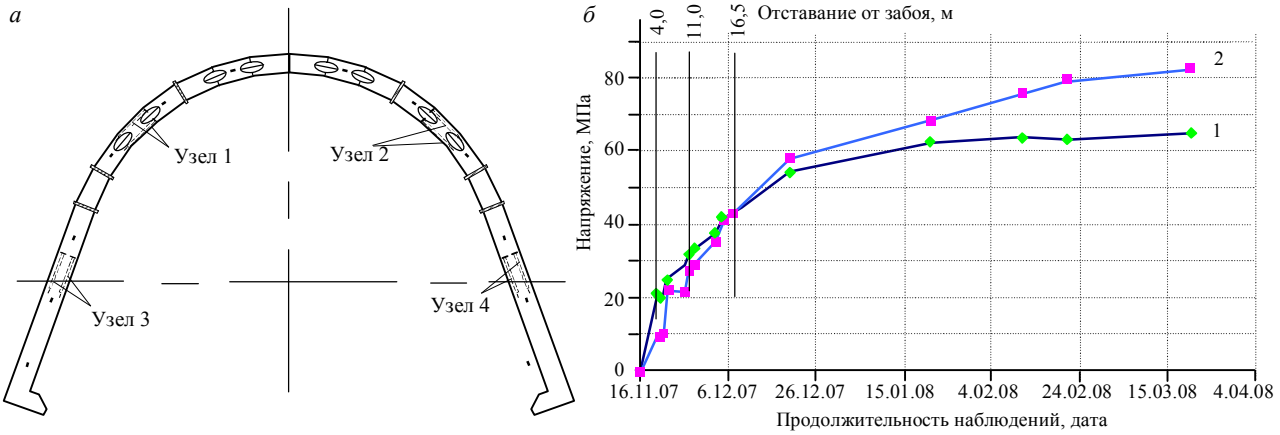


Рис.6. Оснащение стальной арки контрольно-измерительной аппаратурой в узлах 1-4 (*а*) и график формирования нормальных тангенциальных напряжений в одном из узлов по периметру крепи на внешнем (1) и внутреннем (2) контуре (*б*)

В рамной крепи для исследований ее напряженно-деформированного состояния использовали струнные датчики – деформометры ПЛДС-400. Установка датчиков на стальные рамы была осуществлена по схеме, показанной на рис.6, *а*. В каждом узле по периметру рамы датчики устанавливались на внутреннем и внешнем контуре. На рис.6, *б* показаны характерные для опытных участков графики развития во времени нормальных тангенциальных напряжений в поперечных сечениях арочно-бетонной крепи.

Наиболее интенсивно напряжения растут в течение двух недель. За это время отход забоя составляет 15 м. В конце этого периода напряжение составляет около 40 МПа. В дальнейшем приращение напряжений менее значительно и постепенно скорость приращения уменьшается.

Результаты проведенных исследований при проходке вентиляционного тоннеля показали следующее:

• усилия в рамной крепи не превышают 50 % ее несущей способности, что дает возможность при проектировании в аналогичных инженерно-технических условиях снизить материалоемкость крепи или увеличить шаг установки рам;

• нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем и наружном контурах сжимающие.

Приведенные результаты исследований показали, что при взаимодействии обделок (крепей) и вмещающего грунтового массива сохранялась его сплошность. Поэтому были выполнены расчеты методами механики сплошной среды [2] по всем представленным опытным участкам, которые показали близкую сходимость в отличие от результатов расчетов на заданные нагрузки, где практически во всех случаях появляются растягивающие нормальные тангенциальные напряжения.

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.649*

В данном методе рассматривается плоская контактная задача теории упругости для кольца произвольной формы (с одной осью симметрии), подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой однородной изотропной среде (рис.7). Кольцо S_1, моделирующее крепь, ограничено контурами L, L_1, имеет деформационные характеристики E_1, ν_1 (соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона материала крепи) и работает совместно со средой S_0, моделирующей массив пород, имеющей характеристики E_0, ν_0, т.е. векторы напряжений и смещений на линии контакта L непрерывны.

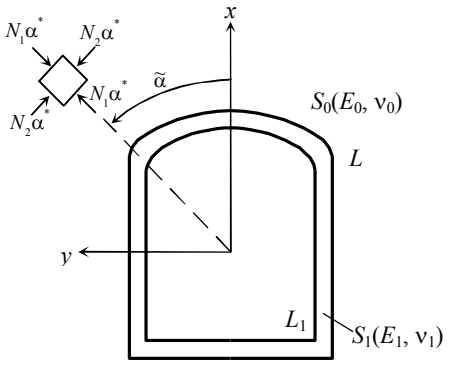


Рис.7. Расчетная схема контактной задачи о взаимодействии крепи с массивом грунта

Среда имеет начальное напряженное состояние, которое в общем случае характеризуется главными напряжениями N_1 и N_2, действующими под произвольным углом $\tilde{\alpha}$ к вертикали и горизонтали. Наклонное положение главных осей начальных напряжений может вызываться действием тектонических сил в массиве.

Заключение. Многолетние исследования формирования НДС обделок транспортных тоннелей и других подземных сооружений позволяют сделать вывод, что во многих случаях строительства тоннелей различного назначения, где смещения грунтового массива не нарушают сплошности вмещающего массива, расчеты крепей и обделок следует вести методами механики сплошной среды. Методы расчета НДС вблизи подземных сооружений с учетом предельного состояния массива приведены в работах [9, 13, 14].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Безродный К.П.* Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа / К.П.Безродный, М.О.Лебедев // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 5 (24) [Электронный ресурс]: http://naukovedenie.ru/sbornik5/24.pdf.

2. *Булычев Н.С.* Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н.С.Булычев, Н.Н.Фотиева, Е.В.Стрельцов. М.: Недра, 1986. 288 с.

3. *Безродный К.П.* Взаимодействие обделки с массивом при строительстве перегонных тоннелей метрополитенов глубокого заложения / К.П.Безродный, А.Г.Протосеня, М.О.Лебедев // Горный журнал. 2002. № 9. С.30-33.

4. Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК / К.П.Безродный, М.О.Лебедев, В.А.Марков, А.Ю.Старков // Метро и тоннели. 2015. № 5 С.16-18.

5. *Лебедев М.О.* Напряженно-деформированное состояние обделок наклонных тоннелей, сооруженных по различным технологическим схемам / М.О.Лебедев, Г.Д.Егоров // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. Ч. 2. 2015. С. 18-26.

6. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг / А.Г.Протосеня, Ю.Н.Огородников, П.А.Деменков, М.А.Карасев, М.О.Лебедев, Д.А.Потемкин, Е.Г.Козин. СПб.: Изд-во СПГГУ-МАНЭБ, 2011. 355 с.

7. Новые технико-технологические решения для строительства тоннелей метрополитена в условиях мегаполиса / В.А.Маслак, К.П.Безродный, М.О.Лебедев, С.Г.Гендлер // Горный журнал. 2014. № 5. С. 57-60.

8. *Протосеня А.Г.* Расчет нагрузок на обделки тоннелей метрополитенов, сооружаемых в физически нелинейных грунтовых массивах / А.Г.Протосеня, М.О.Лебедев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2002. № 5. С. 41-44.

9. *Протосеня А.Г.* Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, Н.А. Беляков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 3-7.

10. Пути повышения надежности крепи и сохранения материалоемкости обделок тоннелей / Н.Н.Фотиева, Н.С.Булычев, К.П.Безродный, С.Н.Сильвестров, Р.И.Касапов // Механика подземных сооружений / Тульский политехнический институт. Тула, 1986. С.3-10.

11. Размыв. История преодоления / Н.И.Кулагин, К.П.Безродный, Д.М.Голицынский и др. СПб: ТА Инжиниринг, 2005. 119 с.

12. *Bezrodny K.* Construction of Escalator Tunnels of the St. Petersburg Subway / K.Bezrodny, M.Lebedev, G.Yegorov // SEE Tunnel:Promoting Tunneling in SEE Region: ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, May 22-28, 2015, Dubrovnik, Croatia. P. 20-22.

13. *Protosenya A.G.* Elastoplastic problem for noncircular openings under Coulombs criterion / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, N.A.Belyakov // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. № 1. P. 53-61.

14. *Protosenya A.G.* Investigating mechanical properties of argillaceous grounds in order to improve safety of development of megalopolis underground space / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, D.N.Petrov // International Journal of Applied Engineering Research. Research India Publications. 2016. Vol. 11. № 16. P. 8949-8956.

Авторы: **К.П.Безродный**, *д-р техн. наук, советник генерального директора по научно-исследовательской работе, besrodny@lenmetro.ru* (*ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия*), **М.О.Лебедев**, *канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, lebedev-lmgt@yandex.ru* (*ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия*).

Статья принята к публикации 29.09.2017.