

2. Балденко Д.Ф., Медведева Л.Н. Усовершенствование конструкции рабочих органов забойных винтовых двигателей / М.: Машины и нефтяное оборудование. 1982. № 5. С. 9–10.
3. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Винтовые забойные двигатели / М.: Недра. 1999. С. 374.
4. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины: 2 т. Т. 2. Винтовые забойные двигатели. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 858 с.
5. Бобров М.Г. Результаты внедрения новых винтовых забойных двигателей Пермского филиала ВНИИБТ / М.: Вестник ассоциации буровых подрядчиков. 2000. №1. С. 36–40.
6. Budepudi V. Drilling fluid type affects elastomer selection /Budepudi V., Michael Wilson J., Patel A. // Oil and Gas Journal. 1998. № 5. P. 75 – 80.
7. Коротаев Ю.А., Чудаков Г.Ф., Николаев В.Ю. Винтовые насосные секции и насосные установки Пермского филиала ВНИИБТ // Строительство нефтяных скважин на суше и на море, 2003. – № 9.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / под. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
9. Плотников В.М., Фуфачев О.И. Тепловой расчет резиновой обкладки статоров винтовых забойных двигателей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2010. – № 9. – С. 3–6.
10. Голдобин Д.А., Коротаев Ю.А. Особенности конструкции и технологии изготовления статоров винтовых забойных двигателей ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент», армированных стальной тонкостенной винтовой оболочкой // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2010. – № 11.
11. Коротаев Ю.А., Цепков А.В., Шулепов В.А. Опыт шлифования роторов винтовых забойных двигателей абразивным эластичным кругом. Перестройка инструментального производства - важная задача 12 пятилетки : тез. докл. науч.-техн. конф. инструментальщиков Урала. – Пермь, 1988. – С. 41–42
12. Шулепов В.А., Цепков А.В. Технология чистой зубообработки роторов винтовых гидродвигателей / Повышение эффективности и качества в механосборочном производстве : тез. докл. научн.-техн. конф. в рамках программы международной выставки Технология - 91. – Пермь, 1991. - С. 4-5.
13. Шулепов В.А., Цепков А.В. Отделочная обработка роторов винтовых гидродвигателей : тез. докл. 27 научно-технической конференции по результатам научно-исследовательских работ, выполненных в 1988-1990 гг. – Пермь, 1991. – С. 41
14. Коротаев Ю.А., Алпатов А.Н., Трубин А.С., Хохлов В.В., Шулепов В.А. Методы и средства контроля зубчатых поверхностей героторных механизмов винтовых забойных двигателей и насосов. Вестник ассоциации буровых подрядчиков, М.; 2011. –№1, С.16–20.
15. Коротаев Ю.А., Алпатов А.Н., Трубин А.С., Шулепов В.А. Прогрессивная технология и инструмент для зубообработки роторов винтовых забойных двигателей и винтовых насосов. Труды ВНИИБТ, М., 2011, С. 322–328
16. Шулепов В.А. Повышение ресурса рабочих органов винтовых забойных двигателей за счет восстановления статора и ротора. НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2011.– № 5,С. 2–4.

Рукопись поступила в редакцию 17.10.15

УДК 624.015

И.Е. ГРИГОРЬЕВ, В.В. КОНОНЕНКО, кандидаты техн. наук, доц.,
Криворожский национальный университет
Ю.И. ГРИГОРЬЕВ, магистр, ГП «ГПИ «Кривбасспроект»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КОНТУРА НА ХАРАКТЕР НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ОБДЕЛКЕ ТУННЕЛЯ

Приведен краткий обзор типов техногенных объектов, приведена их краткая классификация. Определено, что создание георесурсов необходимо осуществлять в процессе эксплуатации месторождения. Рассмотрен способ формирования техногенного месторождения. Способ предусматривает закладку горизонтальных тоннелей и вертикальных колодцев при формировании техногенного месторождения. Оценено влияние характера геометрической формы контура выработки на характер деформирования и разрушения породного массива. Была рассмотрена круглая и арочная форма сечения выработки. Решение задачи проводилось с помощью метода конечных элементов. Решение реализовано программным комплексом PLAXIS в связи с невозможностью аналитического решения. Комплекс представляет собой пакет вычислительных программ для конечно-элементного расчёта напряжённо-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований. Рассмотренная задача решалась как статическая, для упрощения расчетов была принята модель Кулона-Мора для изотропного грунта. В ходе расчета получены значения напряженно-деформированного состояния на контуре обделки туннеля. Расчеты показали, что толщина крепи туннеля в 300 мм проходит проверку по несущей способности для обоих вариантов сечения конструкции. Установлено, что для арочного варианта обделки выработки преобладают значительные деформации в подошве, что приведет к вспучиванию подошвы выработки. Сделан вывод, что круглое сечение обделки туннеля более предпочтительно как с точки технологически-конструктивных, так и деформационных особенностей. Более детальные ре-

зультаты исследований позволит получить динамический анализ устойчивости контура выработки и использование нелинейных моделей с анизотропным грунтом. Такие расчёты могут являться предметом дальнейших исследований в выбранном направлении.

Ключевые слова: горная порода, техногенные объекты, туннель, обделка, напряжённое состояние, расчётная схема.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В результате длительной разработки месторождений железных руд в ряде регионов Украины сформировалось значительное количество техногенных образований в виде карьеров в отработанном виде, складов некондиционных руд и отвалов пород. Однако данные техногенные образования могут рассматриваться не только как побочные продукты горнодобывающей промышленности, наносящие ущерб сложившейся экосистеме, но и как потенциальные ресурсы.

Анализ исследований и публикаций. Большой объём исследований в этом направлении был выполнен группой учёных под руководством И.Л. Гуменика [1], которыми была проведена классификация и систематизация техногенных образований в соответствии с их основной принадлежностью: минерально-сырьевые образования (отвалы, шламохранилища), ландшафтные (выработанное пространство, зоны обрушений) и экологические (непригодные земли и т.п.). Множество исследований проведено по данной проблеме выполнено другими отечественными и зарубежными учеными [2-9].

Значительную часть техногенных образований составляют породные отвалы. Техногенное минеральное сырьё, слагающее отвалы, может иметь широкое применение в различных отраслях промышленности. Но при формировании таких техногенных объектов их дальнейшее использование практически не принимается во внимание. Бессистемное складирование забалансовых полезных ископаемых, как правило, осуществляется с перемешиванием горных пород различных типов, что впоследствии приводит к значительному росту издержек на их разработку.

Размещение временно некондиционных пород, использование которых в настоящее время нецелесообразно, в выработанном пространстве карьеров наиболее перспективно с точки зрения сохранности сельскохозяйственных земель и обеспечения высоких технико-экономических показателей открытых горных работ. Однако имеющиеся технологические схемы и научно-методическая база требует дальнейших исследований для эффективных способов внутреннего складирования пород для их последующей разработки. В проектах практически не предусматривается использование выработанного пространства карьеров в качестве инженерных сооружений с позиций использования георесурсов.

Изменение подхода к проектированию и эксплуатации карьеров позволит формировать техногенные георесурсы на этапе отработки месторождений.

Однако слабая изученность закономерностей изменения ценности техногенных георесурсов от условий и способов их формирования, отсутствие систематизации самих способов не позволяют в полной мере использовать ресурсный потенциал отвалов и выработанного пространства карьеров [2-9].

Постановка задания. Выбор и реализация способов формирования техногенных георесурсов позволит снизить ресурсоемкость открытого способа разработки, расширить область его эффективного применения, а также уменьшить вредное воздействие техногенных объектов на окружающую среду. Поэтому обоснование способов формирования техногенных объектов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, как в контурах карьера, так и за его пределами, является актуальной научно-практической задачей. Один из способов формирования техногенного месторождения реализуется следующим образом.

Изложение материала и результаты. С помощью бульдозера планируется горизонтальная поверхность. На сформированной площадке монтируются сборные элементы крепи (железобетонные тубинги) горизонтальных тоннелей. С помощью бульдозера эти элементы наклонными слоями покрываются техногенным сырьём до получения пионерной насыпи. При этом в местах пересечения горизонтальных и вертикальных формируемых объектов монтируются вибрационные люки с целью уменьшения динамических нагрузок на кузова подвижного состава технологического транспорта при разработке техногенного месторождения. Далее монтируется система крепей вертикальных колодцев, которая при наращивании по высоте постепенно обвалывается бульдозером с целью исключения механических повреждений.

При строительстве рассмотренных объектов техногенного месторождения необходимо решить задачу о геометрической форме и несущей способности крепи формируемого тоннеля.

Для оценки влияния геометрической формы контура тоннеля на характер неупругого деформирования и разрушения вмещающего массива рассмотрим горную выработку (туннель) с различными поперечными сечениями, для которой решена упругая задача.

Для решения соответствующей упруго-пластической задачи воспользуемся методом конечных элементов, реализованного программным комплексом PLAXIS, в связи с невозможностью аналитического решения.

Все модели материалов, используемые в программном комплексе PLAXIS, базируются на зависимости между скоростью изменения эффективных напряжений σ и скоростью прохождения деформаций ε . Такая зависимость может быть представлена в следующем виде: $\sigma = M \cdot \varepsilon$, где M - матрица жесткости материала.

В этом уравнении тензоры скоростей изменения напряжений и деформаций представлены в векторной форме и включают (для пространственных задач) шесть декартовых составляющих

$$\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}),$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx})$$

Для плоских и осесимметричных задач, смоделированных в PLAXIS, используются только четыре составляющие, т.к. $\sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx} = 0$

При проведении расчета малые деформации определяются на основе частных производных компонент перемещений u_x и u_y по следующим формулам

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y};$$

$$\varepsilon_{zz} = 0 \text{ (при плоской деформации)}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{r} u_x \text{ (при осевой симметрии, где } r \text{ – радиус)}$$

В моделях различных материалов используются главные напряжения, которые для случая плоской и осесимметричной деформации рассчитываются на основе декартовых компонент напряжений по формулам

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2};$$

$$\sigma_2 = \sigma_{zz};$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2};$$

Также следует учитывать, что, в PLAXIS главные напряжения располагаются в алгебраической последовательности $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. То есть σ_1 является наибольшее сжимающее напряжение.

При выборе модели материала учитывалось, что наиболее простой является та, которая описывается законом Гука для изотропного линейно упругого поведения (линейно-упругая модель), и задается при помощи следующего уравнения

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2-\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

В данной модели используется только два параметра E и ν .

Зависимость между E и другими модулями жесткости, такими как G (модуль сдвига), K (объемный модуль) и одометрический модуль E_{oed} представлена следующими выражениями

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; E_{oed} = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)};$$

Данная линейно-упругая модель обычно не используется для моделирования явно нелинейного поведения грунта, однако она позволяет с высокой степенью точности моделировать работу конструкций, таких как бетонные стенки и фундаментные плиты.

Однако для приближенной оценки механического поведения грунтов более целесообразно использовать модель Кулона-Мора. Данная упругопластическая модель содержит 5 основных параметров: E и ν - параметры упругости грунта, c и φ - параметры прочности грунта, ψ - угол дилатансии.

Данная модель Кулона-Мора представляет собой аппроксимацию первого порядка поведения грунта, где для каждого слоя рассчитывается постоянная средняя жесткость.

На следующем шаге решения задачи оценки влияния геометрической формы контура выработки на характер деформирования и разрушения породного массива создаем статическую модель, задаем перемещения и нагрузки. К нагрузкам будем относить гравитационную нагрузку, то есть собственный вес горной породы и обделки. Числовое значение нагрузки рассчитываем по формуле $N=H\cdot\gamma$, где H - толщина грунта над тоннелем.

Собственный вес посчитается в модели автоматически с использованием характеристик плотностей материалов.

При задании граничных условий учитываем, что модель не должна иметь во всех направлениях свободные перемещения. Для этого ограничиваются перемещения по направлениям X и Y с боковых сторон и со стороны нижней грани. Верхняя грань - свободная.

Начальные напряжения в грунте определяются, как вертикальные, так и горизонтальные с учетом коэффициента бокового давления K_0 .

При исследовании напряженно-деформированного состояния крепления туннеля программно производится генерирование сетки конечных элементов для нескольких вариантов геометрических форм сечения. В качестве исходных данных использовались: порода - кварцит (прочность на сжатие в среднем 140-200 МПа, объемная масса - в среднем 2,6 г/см³, плотность - в среднем 2,68 г/см³). Толщина обделки туннеля для расчетов согласно СНиП 32-04-97 и межгосударственных строительных норм МСН 3.03-07-97 "Тоннели железнодорожные и автодорожные", принята 250 мм, для вертикального рудоспуска - 300 мм. Высота насыпи уступа - 15-20 м.

Рассмотренная задача решалась как статическая, для упрощения расчетов была принята модель Кулона-Мора для изотропного грунта. Само решение проводилось в программной системе конечно-элементного анализа PLAXIS, которая используется для решения задач инженерной геотехники и проектирования.

Представляет собой пакет вычислительных программ для конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований.

В ходе расчета получены значения напряженно-деформированного состояния на контуре обделки туннеля (рис. 1).

На следующем этапе PLAXIS автоматически производит расчет моментов поперечных и продольных сил в самой обделке, соответствующие эпюры моментов и продольных сил представлены на рис. 2 и 3 для первого и второго варианта обделки туннеля.

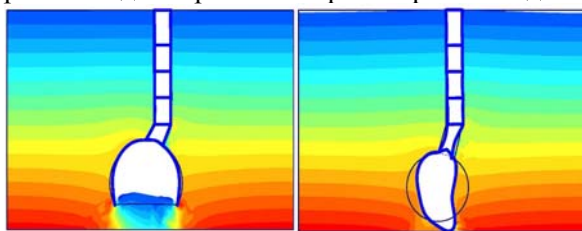


Рис. 1. Расчетное поле полных напряжений

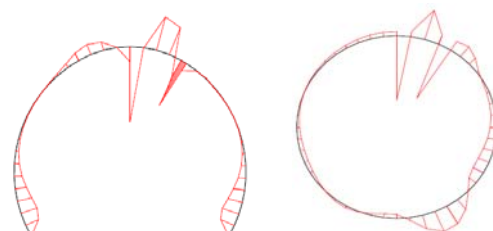


Рис. 2. Эпюра моментов

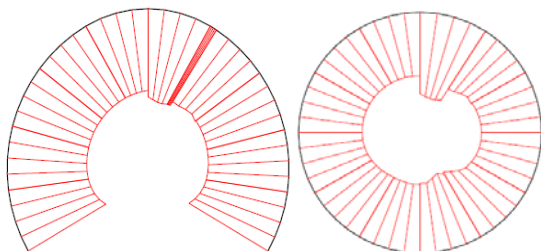


Рис. 3. Эпюра продольных сил

На основании полученных результатов производим расчет эксцентриситета с последующей проверкой условия [10-15]

$$e_{\sigma} \eta = \frac{M}{N} \leq 0.225h$$

Проведенная проверка показала, что условие при толщине обделки от 300 м выполняется, а, следовательно, в сечении обделки туннеля растягивающие напряжения не возникают, и дополни-

тельно проверку следует проводить по формуле внецентренного сжатия [10-15]

$$N \leq N_{пред} = \frac{\gamma_{b6} \cdot \gamma_{b9} \cdot \gamma_{d1} \cdot \gamma_{d3} \cdot R_b \cdot b \cdot h}{(1 + 2\ell_o \eta / h)}$$

где γ_{b6} - коэффициент попеременного замораживания и оттаивания (=1); γ_{b9} - коэффициент отсутствия рабочей арматуры (= 0,9); γ_{d1} - коэффициент отклонения расчетной модели от реальных условий монолитных обделок (= 0,9); γ_{d3} - понижение прочности бетона в обделках без наружной гидроизоляции на обводненных участках; R_b - расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний первой группы (=15,5 Мн/м²); b - расчетная ширина проверяемого сечения (=1 м); h - толщина обделки.

В результате проведенного анализа статической задачи оценки влияния геометрической формы контура на характер напряжений и деформаций в обделке туннеля, расчеты показали, что толщина обделки туннеля проходит проверку по несущей способности, как для первого, так и для второго варианта сечения конструкции.

Однако установлено, что для первого варианта обделки выработки (рис. 4а) преобладают значительные деформации в подошве, что в свою очередь приведет со временем, к вспучиванию подошвы выработки.

Более детальный ответ может предоставить динамический анализ устойчивости контура выработки и использование нелинейных моделей с анизотропным грунтом.

Вывод. Рассмотрев оба варианта сечений и проведя анализ напряжений и деформаций, можно сделать заключительный вывод, что второй вариант обделки туннеля - более предпочтителен как с точки зрения технологически-конструктивных, так и деформационных особенностей.

Список литературы

1. Гуменик И.Л. Классификация техногенных формирований при открытых горных работах / И.Л. Гуменик, А.С. Матвеев, А.И. Панасенко // Горный журнал. – 1988. – №12. – С. 53–54.
2. Трубецкой К.Н. Классификация техногенных месторождений и основные факторы их комплексного освоения / К.Н. Трубецкой, В.Н. Уманец, М.Б. Никитин // Комплексное использование минерального сырья. – 1987. – №12. – С. 18–23.
3. Колесников Д.В. Повышение извлечения железа за счет переработки сырья техногенных месторождений Кривбасса / Колесников Д.В., Короленко М.К., Ступник Н.И., Удод Е.Г., Протасов В.П., Олейник Т.А. – Кривой Рог: Дионис, 2012. – 236 с.
4. Grigoryev Yulian. Dry raw material technogenic deposits formation and development technique / Nikolay Pyzhik, Yulian Grigoryev // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 298–302.
5. Пат. 92077 Україна, МПК E21C 41/26. Спосіб формування техногенного родовища / Григор'єв Ю.І.; заявник та патентовласник Григор'єв Ю.І. – №201402646; заявл. 17.03. 14 ; опубл. 25.07.14, Бюл. №14.
6. Григорьев И.Е. Системный подход к процессу проектирования горных объектов / И.Е. Григорьев, Ю.И. Григорьев // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. №94. – С. 40–44.
7. Трубецкой К.Н. Обоснование объемов и сроков освоения техногенных месторождений / К.Н. Трубецкой, Е.И. Рогов, В.Н. Уманец, М.Б. Никитин // Горный журнал. – 1988. – № 2. – С. 9–12.
8. Ласкорин Б.Н. Безотходная переработка минерального сырья. Системный анализ / Ласкорин Б.Н., Барский Л.А., Персиц В.З. – М.: Недра, 1984. – 334 с.
9. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ / Ржевский В.В. – М.: Недра, 1975. – 574 с.
10. СНиП 32-04-97 «Тоннели железнодорожные и автодорожные», -М.: 1997 г., 20 с.
11. Тоннели и метрополитены / под редакцией В.Г. Храпова, -М.:, 1989 г, - 389 с.
12. Проектирование тоннелей / С.А. Компаниец, А.К. Поправко, А.А. Богородецкий, -М.:, 1979 г, 320 с.
13. ЕНиР сборник 36 ч.2
14. Sopromat.h12.ru/content/biblio/mexan/archive/chap%204.doc
15. Офіційний сайт Plaxis [Режим доступу]: www.plaxis.ru

Рукопись поступила в редакцию 15.04.16