

УДК 622.02

Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов, А.Ю. Педчик

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ НАУЧНОМ
СОПРОВОЖДЕНИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ
СООРУЖЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Накопленный опыт отечественного и зарубежного строительства подземных сооружений сегодня показывает, что эффективность решения задач по оценке качества проходки сооружений тесно связана с использованием результатов геомеханического мониторинга состояния массива. В статье предложено, используя режимный контроль деформаций на структурных нарушениях массива, секущих трассу тоннеля, статистический анализ величин законтурных переборов породы в сечениях тоннеля относительно проектного контура на каждой «уходке» и, определяя параметры нарушенной зоны приконтурного массива оценивать устойчивость обнажений по мере продвижения забоя и качество буро-взрывной отбойки по трех уровневой шкале.

Ключевые слова: подземное сооружение, перебор породы, деформация, нарушенная зона, приконтурный массив.

В результате многолетнего сотрудничества Горного института КНЦ РАН с предприятием ФГУП «Управление строительства №30», накоплен значительный опыт, как в методологическом, так и в практическом плане, решения задач геомеханического контроля за состоянием массива при строительстве подземных сооружений в различных горно-геологических условиях.

При строительстве подземных сооружений геомониторинг представляет собой комплекс геомеханических методов контроля состояния массива. Выбор же конкретных методов зависит от горно-геологических условий строительства подземных сооружений. Так, в настоящее время, при строительстве железнодорожного тоннеля на Хибинском апатит-нефелиновом месторождении, трасса тоннеля в соответствии с действующей «Инструкцией по безопасному

ведению горных работ...» была отнесена по условиям проходки к «склонной» к горным ударам. Кроме того, как показали результаты инженерно-геологических изысканий, на отдельных участках по трассе тоннеля, начиная от пикетов, где глубины заложения от свободной поверхности достигают 400-450 м, и трасса тоннеля пересекает зоны окисленных пород, разломы и дайки, зафиксированы величины скоростей продольных сейсмических волн ($V_p=6.0-7.0$ км/с), превышающие аналогичные характеристики для образцов пород. Кроме того, породы, прилегающие к участкам структурных нарушений, характеризуются высокими значениями динамического модуля упругости ($E_d=(7.5-9.68) \cdot 10^4$ МПа). Данные факты являются признаками существования локальных областей концентрации напряжений в нетронутым массиве, а по мере приближения забоя тоннеля

к участкам структурных нарушений и даек, а также к границам очистных работ, величины напряжений могут превысить установленный порог $0.5\sigma_{сж}$. В подобных ситуациях появление более существенных признаков проявления горного давления в динамических формах (интенсивное заколообразование, дискование керна разведочной скважины, шелушение и стреляние пород на обнажении выработки) является весьма вероятным.

Таким образом, исходя из горно-геологических условий проходки, в качестве методов геомеханического контроля скального массива, был принят режимный высокоточный деформационный контроль по структурным нарушениям массива, секущим трассу тоннеля, статистический анализ величин законтурных перебо- ров породы в сечениях тоннеля относительно проектного контура на каждой «уходке» и оценка параметры нарушенной зоны приконтурного массива. Контроль данных показателей позволяет оценивать устойчивость обнажений по мере продвижения забоя и качество буро-взрывной отбойки.

Методика измерений деформаций с помощью дистометра JSETH (Швейцария), являющегося механическим точным прибором для обнаружения различий в расстояниях с помощью инварной проволоки, хорошо известна.

Точность шкалы измерения длин составляет 10^{-3} мм. Точность измерений с проволокой длиной до 20 м составляет $\pm (2 \cdot 10^{-2})$ мм.

Методика измерений включает:

- установку на выделенных участках массива минимум двух контрольных реперов, расстояние между которыми определяет базу измерения деформаций;

- крепление на установленных в массиве реперах дистометра и инварной проволоки;

- измерение расстояния между реперами (выполняется минимум 3-5 раз с демонтажем/монтажом дистометра на реперах для оценки среднего и погрешности измерений);

- выполнение повторных замеров контролируемых длин, согласно регламенту мониторинга, расчет и оценка абсолютных и относительных фактических невязок (деформаций) измеряемых длин по выражениям:

$$\Delta L_i = |L_{i+1} - L_i| \delta L_i ; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Li} = \frac{\Delta L_i}{L_i} ; \quad (2)$$

где ΔL_i – расчетная невязка измеренных показаний индикатора прибора i -того (L_i) и ($i+1$, L_{i+1}) измерений, мм; δL_i – абсолютная погрешность отсчета показаний прибора, ($\delta L_i = 0.05$ мм); ε_{Li} – относительное изменение отсчета показаний прибора при мониторинге.

Как видно из выражения (2) значимым считается такое изменение длин, которое будет превышать погрешность измерений.

Деформационные наблюдения выполнялись по реперам, размещенным в стенках вдоль трассы тоннеля на четырех участках, вмещающих зоны окисленных пород, участки тектонических разломов и зоны повышенной трещиноватости. Первый участок - реперы 1-5, размещены в припортовой части тоннеля. Второй участок – реперы 6-8 по берегам зоны трещиноватой зоны, и, наиболее неоднородная и протяженная в геологическом отношении зона третьего и четвертого участков реперы 9-14.

На рис. 1 приведены результаты измерений относительных деформаций за 9 месяцев наблюдений.

Как видно из приведенных данных, за время наблюдений знакопеременный характер изменений деформаций зафиксирован в припортовой области тоннеля, реперы 1-5, где в

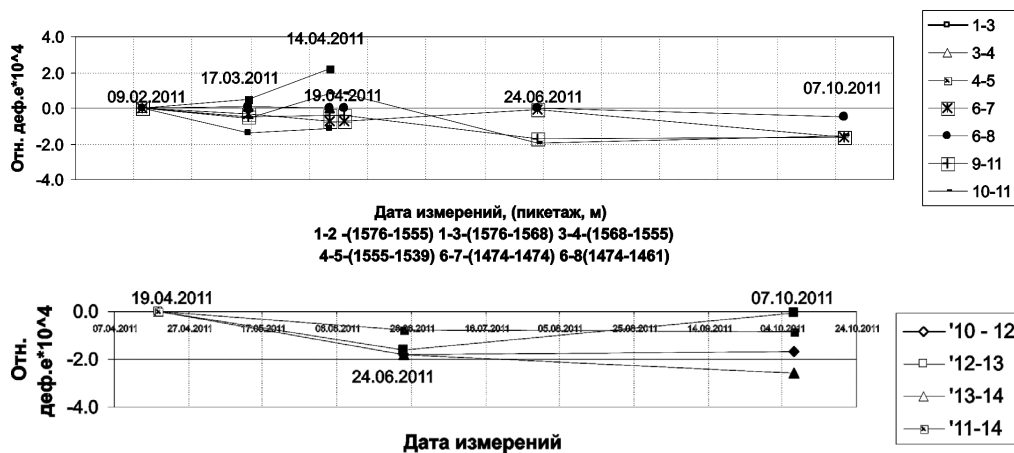


Рис. 1. Результаты контроля деформаций на измерительных полигонах Южского тоннеля

большой мере сказывается преобладающее влияние на массив естественных природных процессов планетарного уровня, также имеющих знакопеременный характер. По мере роста глубины заложения от свободной поверхности при продвижении забоя, на деформационные процессы в большей мере начинают влиять геомеханические факторы при взаимодействии выработки и естественного поля напряжений. На неоднородностях массива происходит постепенная релаксация напряжений, проявляющаяся в появлении сжимающих деформаций, что и фиксируется на измерительных реперах. Из рис. 1 прослеживается также, что в период с апреля по июнь фиксировались отрицательные деформации сжатия на полигонах 3, 4, в точках 9-11, 10-11, 10-12, 12-13, 13-14. Эти точки размещены в сложной геологоструктурной области массива, вмещающей и мощную зону окисленных пород и зоны повышено трещиноватых пород, секущих трассу тоннеля. Таким образом, сам факт проявления сжимающих деформаций свидетельствует о наличии напряжений в мас-

сиве и необходимости с особым вниманием относиться к рекомендациям по проходке тоннеля в условиях угрожаемых по горным ударам.

Величину напряжений можно оценить по значениям фиксируемых деформаций. Оценивая порядок полученных относительных деформаций в стенках тоннеля в точках 9-11, 10-11, 10-12, 12-13, 13-14, достигающих $\varepsilon = (-2.554) \cdot 10^{-4}$ ед. отн. деф., что соответствует абсолютной деформации 0.255 мм/м, и, исходя из средних для ийолит-уртитов значений модулей упругости пород в пределах $E = (7.5-9.68) \cdot 10^4$ МПа, доля реализуемых на нарушении действующих напряжений составляет

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon = (19.1-24.7) \text{ МПа.}$$

Тогда, принимая для ийолит-уртитов

$$\sigma_{сж} = 184 \text{ МПа, получаем}$$

$$\sigma_x / \sigma_{сж} = 24.7 / 184 = 0.13.$$

Полученная величина данного соотношения позволила отнести этот участок к неопасному по проявлению горного давления в динамических формах. Как показал следующий по дате цикл наблюдений, рис. 1, рост деформаций на данном участке больше не фиксировался.

Таблица 1

Тип выработки	Переборы, мм, при коэффициенте крепости f		
	1-4	4-12	12-20
Тоннели	100	150	200
Стволы и штольни	75	75	100

Суммарная деформация массива при этом, с учетом величины периметра тоннеля, равного 32 м, оценивается как $32 \cdot 0.255 = 8.16$ мм. Тогда, исходя из рекомендаций СНиП [1], категорирующего состояние подземных выработок по устойчивости, исходя из суммарных деформаций массива, участок Юкспорского тоннеля отнесен к вполне устойчивому (I категория устойчивости).

Еще одной поставленной задачей геомеханического мониторинга состояния массива является оценка качества буро-взрывных работ в процессе проходки тоннеля. Она выполняется на основе совместного анализа данных натурных реометрических наблюдений параметров приконтурного массива – мощности нарушенной зоны (Н) и коэффициента проницаемости (K_f) и данных о величинах законтурных нарушений (переборов породы).

В отечественной практике строительства подземных сооружений оценка качества оконтуривания подземных горных выработок, как известно, осуществляется по нормативам СНиП, ограничивающим величину допустимых законтурных переборов в зависимости от конкретных условий проходки. В частности, например, [2], предписывает следующие допустимые переборы при проходке

буро-взрывным способом для горных пород крепостью $f=1-20$ по М.М. Протодяконову.

Методика оценки качества проходки основана на статистическом анализе фактических значений величин переборов породы. Обычно, вся совокупность переборов характеризуется неоднородностью ее членов, выражающаяся в причинах их возникновения, которых две: непосредственно техногенные и переборы, возникающие вследствие структурной неоднородности массива пород, приводящей к возникновению отдельных вывалов. Влияние последней учитывается используя прием оценки совместимости группы значений переборов, превышающей некоторую величину X_{max} , соответствующую заданной доверительной значимости при выборочной дисперсии для данного распределения (доверительный интервал).

Для решения задачи оценки качества проходки Юкспорского тоннеля статистическому анализу фактических значений величин переборов, предоставленных маркшейдерской службой предприятия СМУ-680, было подвергнуто 172 сечения с шагом «уходки», равным 3.0 м, в интервале пикетов ПК 1270-665 м. Численные значения величин средних отклонений от проектного контура изменялись в диапазоне -0.165 м до 0.34 м, из которых при статистической обработке были исключены случаи (3 случая) «недоборов». Распределения величин средних значений переборов по трассе тоннеля показано на рис. 2.

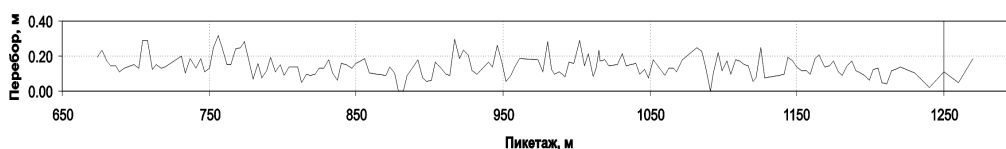


Рис. 2. Распределения величин средних значений переборов по трассе тоннеля

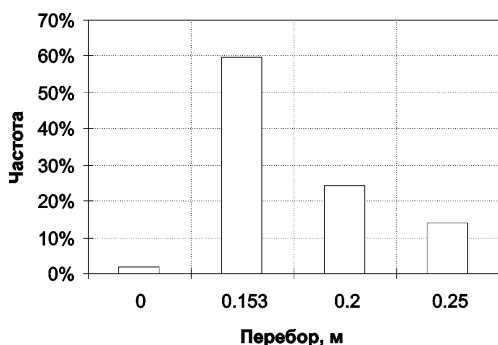


Рис. 3. Гистограмма распределения величин переборов Юкспорского тоннеля

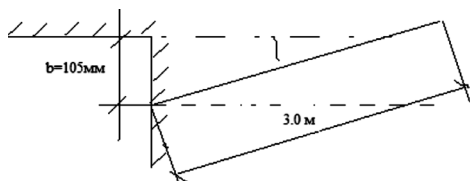


Рис. 4. Схема пространственного расположения контурных шпуров относительно оси и проектного контура выработки

Результаты статистического анализа представлены в табл. 2. Расчеты выполнены для уровня значимости $\alpha = 0.01$, что соответствует доверительной вероятности 99%.

Таким образом, как показали результаты обработки, переборы, превышающие величины $X_{\max} = 0.153$ м обусловлены структурой массива.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения величин переборов с учетом выполненного статистического анализа.

Для оценки качества буровзрывных работ (БВР) принята трехуровневая шкала: «отлично», «хоро-

шо», «удовлетворительно». В качестве первого критерия, определяющего допустимую величину перебора, логично принять параметр буровых машин, характеризующий расстояние от центра буровой штанги до наружного выступа буровой установки и угла пространственной ориентировки контурных шпуров относительно оси выработки, как это показано на рис. 4. Эта величина принята по габаритам применяемых гидроперфораторов типа

ГЛ438 и ГЛ538, для которых она соответственно равна $b_1 = 100$ мм и $b_2 = 105$ мм. В этом случае при производстве БВР величина переборов не должна превышать $X \approx 0.1$ м по всему периметру выработки, образованному методом контурного взрывания с оценкой «отлично». Тогда, с учетом результатов статистического анализа и рис. 3, с оценкой «отлично» принимаются результаты проходки по величинам переборов, попадающие в расчетный доверительный интервал, т. е. (0.131 - 0.153) м. С оценкой «хорошо», с учетом требований СНиП, [2], табл. 2, при значениях переборов в интервале $0.153 \text{ м} < X \leq 0.20 \text{ м}$. С оценкой «удовлетворительно» $0.2 \text{ м} < X \leq 0.34 \text{ м}$. Верхняя граница последнего интервала принята исходя из анализа накопленного опыта в условиях проходки выработок с использованием контурных зарядов ЗКВК 26 ОАО «Апатит» и объектов строительства ФГУП УС-30 [3, 4].

По результатам выполненного анализа качества БВР по величинам за-контурных переборов, можно заключить, что проходка выполнена с оценкой «отлично» для 62 % трассы тонне-

Таблица 2

Выборка, м	Размер выборки	Среднее значение, м	Стандарт отклонения σ , м	Доверительный интервал, м	$(X_{\min} - X_{\max})$, м
0-0.34	172	0.142	0.0595	± 0.011	0.131-0.153

ля, с оценкой «хорошо» - 24 % трассы тоннеля и с оценкой «удовлетворительно» -14 % трассы тоннеля.

При оценке качества БВР при проходке тоннеля с позиций его устойчивости необходимо учитывать и параметры нарушенной зоны приконтурного массива, образованной в процессе проходки.

К числу наиболее простых и доступных инженерных методов контроля параметров нарушенной зоны приконтурного массива, относится реометрический метод [5]. В данном методе используются закономерности изменения параметров фильтрации сжатого воздуха через трещины в нарушенных массивах пород.

На контрольных участках массива оборудуют наблюдательные станции, состоящие из двух-трех параллельных шпуров в стенках выработки. Расстояние между шпурами принимается исходя из обеспечения необходимого режима истечения воздуха через трещины массива и, обычно составляет 0,4- 0,6 м. Количество наблюдательных станций определяется в зависимости от изменчивости геологической структуры участка, но не менее трех на каждом участке. На каждой наблюдательной станции в процессе измерений фиксируются мощность h нарушенной зоны (ЗНС), от контура выработки (ближайшее расстояние от контура при отсутствии утечек сжатого воздуха) и коэффициент проницаемости нарушенной зоны ($K_{n(i)}$, ати/м·мин). Последний определяется из выражения:

$$K_{n(i)} = \frac{\Delta P}{\Delta L \cdot t_i} \quad (3)$$

где ΔP – падение давления в контрольном резервуаре на исследуемом участке, ати; ΔL –длина отрезка шпура, находящегося под давлением, м; t_i –время падения давления, мин.

Комплект аппаратуры для реализации реометрического метода довольно прост и включает измерительную штангу, оснащенную запорными резиновыми пакерами, аккумуляющую емкость для сжатого воздуха с манометром и комплект соединительных воздушных шлангов.

При выполнении измерений штанга размещается в шпуре наблюдательной станции, контрольный участок шпура герметизируется с помощью пакеров и в него нагнетается сжатый воздух. Таким образом, на каждой станции, исходя из замеренного режима истечения сжатого воздуха через трещины массива, определяется мощность нарушенной зоны от контура выработки и коэффициент проницаемости по формуле (3).

С помощью данного метода решаются задачи контроля устойчивости выработок при их проходке в сложных горно-геологических условиях. Многочисленные наблюдения показали, что конфигурация нарушенной зоны обычно повторяет контур выработки, а ее мощность вглубь массива в подавляющем большинстве случаев не превышает 0,4 м при глубинах заложения выработок до 600 м и площадях поперечных сечений до 40 м². Эти результаты позволили обосновать количественный критерий устойчивости выработок в массивах скальных пород – мощность нарушенной зоны от контура выработки в глубь массива не более 0,4 м. Этот критерий можно распространить и на оценку качества БВР с отметкой «отлично». Как показывает многолетний опыт ведения реометрического мониторинга при проходке выработок, образование нарушенной зоны с мощностью превышающей 0,4–0,6 м от контура выработки, как правило, связано в большей степени со структурой массива и наблюдается на участках повышенно

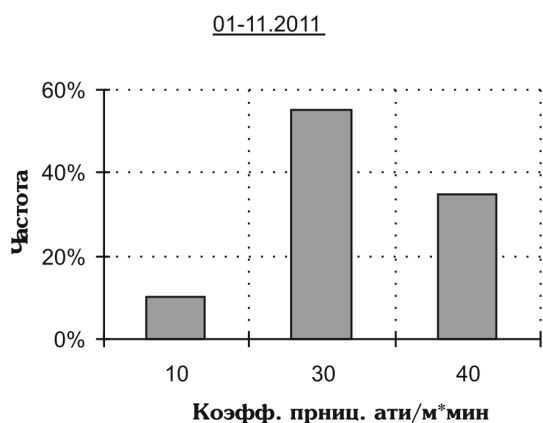
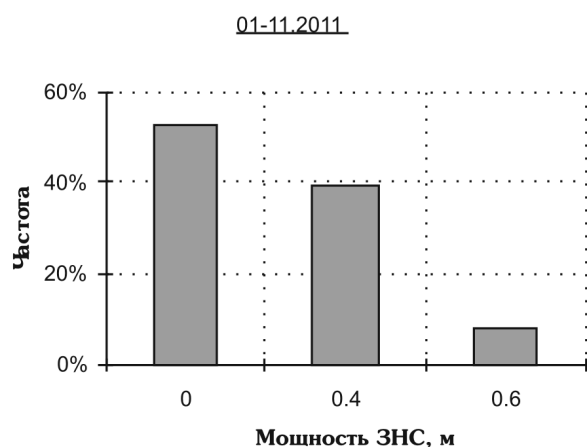


Рис. 5. Результаты реометрических наблюдений в Юкспорском тоннеле

трещиноватых пород, участках тектонических нарушений, в окисленных зонах. Получаемые данные о мощности и проницаемости нарушенной зоны, таким образом, позволят более адекватно выполнить оценку качества БВР на участках структурно нарушенных пород.

Кроме того, используя зависимость мощности нарушенной зоны приконтурного массива от фактора напряженности, можно качественно оценивать изменение напряженного состояния в зависимости от величин h по трассе тоннеля. Известно, что при

прочих равных условиях, напряжения, действующие в массиве и не превышающие значений $(0.3-0.5) \cdot [\sigma_{ср}]$, способствуют снижению мощности нарушенной зоны.

На рис. 5 представлены результаты обработки данных измерений реометрическим методом в виде гистограмм распределения h и K_n за период март-ноябрь 2011 г на 35 наблюдательных станциях.

Как видно из приведенных гистограмм, приконтурный массив Юкспорского тоннеля характеризуется наличием нарушенной зоны, мощность которой от контура выработки в 92% случаев не превышает величину 0.4 м, что характеризует массив в целом как вполне устойчивый. Суммарное раскрытие трещин в пределах нарушенной зоны, судя по распределению коэффициентов проницаемости, близко к максимальному порогу чувствительности реометрической установки, составляющее первые миллиметры.

Совместный анализ варьирования мощности нарушенной зоны приконтурного массива по трассе тоннеля, величин законтурных переборов и геологии по трассе тоннеля показал, что для участков по качеству проходки, оцененного как «удовлетворительное» ($X > 0.2$ м), характерны повышенные значения величин h . Судя по полученным результатам совместной корреляции, табл. 3, становятся очевидны причины такой оценки - структурные нарушения массива, секущие трассу выработки.

Таблица 5

Пикетаж по трассе тоннеля, м	Величина перебора, м	Мощность нарушенной зоны, h, м	Характеристика участка
1125	0.245	0.4	Зона окисленных пород
1082	0.245	0.2-0.4	Зона окисленных пород
1002	0.288	0.4-0.6	Зона повыш. трещиноватости пород
980	0.280	0.4	Зона повыш. трещиноватости пород
946	0.265	0.4	Зона повыш. трещиноватости пород
917	0.299	0	Отдельные трещины в массиве

Таким образом, организация научного сопровождения строительства подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях на основе геомеханического контроля со-

стояния массива, позволяет оперативно решать комплекс проектно-технологических задач и обеспечить необходимую безопасность горно-проходческих работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 11-94-80 – Подземные горные выработки, М., 1980.
2. СНиП III-44-77 – Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. М., 1977.
3. Епимахов Ю.А. Фокин В.А., Абрамчук В.П. Особенности оценки и управления качеством контурного взрывания при проходке большепролетных выработок в скальных породах. Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. ТИМР, №4, 1998, с. 3-6.
4. Мельников Н.Н., Епимахов Ю.А., Абрамов Н.Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве, - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008, -226с.
5. Руководство по определению нарушенности пород вокруг выработок реометрическим методом. АН СССР, Кол. Фил. Горно-мет. Ин -т. - Апатиты: изд. Кольского филиала АН СССР, 1971. - 44 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Абрамов Николай Николаевич – ст. научный сотрудник, чл. корр. МАНЭБ, Горный институт КНЦ РАН, E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru
Епимахов Юрий Александрович – доктор технических наук, академик АГН, зав. лабораторией, Горный институт КНЦ РАН, E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru
Педчик Александр Юрьевич – зам. начальника управления №30, Управление строительством №30, Башкортостан.

