

С.Н. СТОВПНИК, канд. техн. наук, доц., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
А.С. ОСИПОВ, аспирант, Проектный институт «Укрспецтоннельпроект»,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО ПОДХОДА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ВРЕМЕННОЙ КРЕПИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ФЛИШЕВОГО СЛОЖЕНИЯ ГЕОМАССИВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕСКИДСКОГО ТОННЕЛЯ

Цель. Предложить новый алгоритм расчёта временной крепи, позволяющий приблизиться к реальной оценке напряжено-деформированного состояния горного массива вокруг выработки. Предоставить информацию об инженерно-геологических условиях участка строительства и основных инженерных сложностях, с которыми столкнулись проектировщики и строители при реализации объекта Бескидский тоннель. Определить параметры конструкции временной крепи в условиях анизотропного геомассива.

Методы исследования. Комплексный анализ проведения горнопроходческих работ в конкретных условиях проходки Бескидского тоннеля по оценке параметров основных технологических процессов: скорость бурения шпуров и скважин; степень воздействия буровзрывных работ на состояние устойчивости породных обнажений тоннеля.

Научная новизна. На примере строительства Бескидского тоннеля в статье предложен новый подход к расчёту временной крепи, базирующийся на Q -системе норвежского метода строительства тоннелей и новых возможностях моделирования горных пород с помощью геотехнических программных комплексов, основанных на методе конечных элементов (Plaxis, Midas GTS, Phase2 и других).

Практическое значение. Предложен новый алгоритм расчёта временной крепи, позволяющий смоделировать приближенно к реальному поведению приконтурного массива выработки совместно с временной крепью (их общая деформация) в условиях флишевого сложения геомассива и определить параметры конструкции, отвечающие требованиям надежности и безопасности.

Результаты. Геологоразведка в сочетании с непосредственными инструментальными наблюдениями в забое тоннеля фактических деформаций и сложного фактического поля напряжений в геомассиве, обусловленного как гравитационными, так и тектоническими силами, дала возможность разработать новые аспекты, которые, может быть в будущем, будут отмечены в новых нормативных документах Украины. Для отражения реальной работы крепи подземных сооружений с горным массивом (их общая деформация) в условиях флишевого сложения, авторами был предложен принципиально новый подход к определению параметров конструкции временной крепи тоннелей, проходка которых выполняется горным способом.

Ключевые слова: коэффициент крепости, система Q норвежского метода строительства тоннелей, классификация RQD.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-67-73

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Определение параметров конструкции временной крепи в условиях анизотропного геомассива (флишевой толщи).

Анализ исследований и публикаций. Существующая классификация горных пород по проф. Протогьяконову, широко используемая в учебной и научно-технической литературе по тоннелестроению не совершенна в сложных условиях флишевого сложения геомассива.

Постановка задачи. Предложить новый алгоритм расчёта временной крепи, позволяющий приблизиться к реальной оценке напряжено-деформированного состояния (НДС) горного массива вокруг выработки.

Изложение материала и результаты. 1. *Краткое описание геологической ситуации объекта строительства Бескидский тоннель* [1].

Участок строительства двухпутного железнодорожного Бескидского тоннеля географически представляет часть Восточных (Украинских Карпат), на границе между Львовской и Закарпатской областями. Территория участка строительства - горная. Тоннель находится в районе Главного Карпатского хребта на высоте 800 м выше уровня моря. На стадии «проект» и «рабочая документация» на участке строительства был выполнен комплекс инженерно-геологических изысканий. Трасса строящегося Бескидского тоннеля проходит в коренных породах кросненской свиты палеогена неоднородных по физико-механическим свойствам, представляющая собой груборитмический флиш с подчиненными прослойками аргиллитов и алевролитов, пачками чередования песчаников. Мелкозернистые песчаники и алевролиты - извест-

ковые, с многочисленными прожилками кальцита, косослоистые; аргиллиты - черные, тонкоплитчатые. Угол падения пород в среднем составляет 45° в Юго-Западном направлении. По трассе выявлены участки разрушенных зон и зон повышенной прочности пород (окварцованные песчаники). Мощность аргиллитовых толщ варьируется от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Прочность на одноосное сжатие всех представленных в разрезе пород находилась в пределах от 10 до 124 МПа. В водонасыщенном состоянии прочность пород снижалась на 20-45 %.

К характерным особенностям инженерно-геологических условий строительства Бескидского тоннеля следует отнести высокий уровень параметров напряженно-деформированного состояния горных пород вмещающего массива. Массив характеризуется склонностью к проявлению горного давления.

Тектонические дислокации массива увеличивают его трещиноватость, что приводит к возрастанию водопроницаемости и снижению прочности в процессе проходки. Неблагоприятными для устойчивости пород при проходке тоннелей являются обычно системы трещин с субпараллельным простиранием по отношению к оси выработки, имеющие крутые углы падения (от 40° до 80°), глинистый заполнитель, зеркала скольжения (рис. 2). В этих случаях при нарушении технологии проходки неизбежны значительные перебои и вывалы породы.

Все это провоцирует возникновение ряда негативных геомеханических процессов, таких как нарастание горного давления, потеря устойчивости выработки с образованием значительных по объему вывалов пород.

2. *Определение крепости пород применительно к условиям строительства тоннеля. Недостатки стандартизованного метода определения коэффициента крепости $f_{кр}$.*

Согласно [1], крепость породы по шкале Протодьяконова колебалась от 2 до 8, что послужило основанием предусмотреть на стадии «проект» и «рабочая документация» проходку тоннеля с разработкой пород буровзрывным способом. Причиной значительного разброса в значениях коэффициента крепости пород, определенного стандартизованным методом (ГОСТ 21153.1-75), является оценка низкой степени надежности на этапе инженерно-геологических изысканий ввиду малого объема испытаний и мест отбора проб по трассе тоннеля. Низкая надежность оценки является причиной отклонений базовых характеристик от действительных. Это обусловлено как недостаточно четкой методической проработкой данного метода (по ГОСТ 21153.1-75), так и отсутствием его тесной взаимосвязи с базовыми характеристиками прочности пород ($R_{сж}$, R_p), которые к настоящему времени являются основными при оценке параметров различных технологических процессов и конструктивных решений. В качестве доказательств на рис. 1 приведены данные сравнения результатов определения коэффициента крепости пород стандартизованным методом (по ГОСТ, кривая 1) с фактическими условиями при проходке тоннеля, полученными на основе комплексного анализа $f_{кр} \approx f(R_{сж})$ (кривая 2). Для визуальной оценки результатов, на данном рисунке также приведена зависимость $f_{кр} = R_{сж}/10$ (МПа), часто используемая на практике для экспрессного анализа крепости пород.

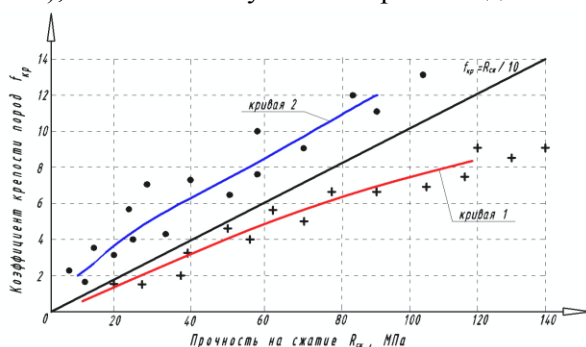


Рис. 1. Результаты определения крепости пород: + - для пород флишевой толщи; • - для фактических условий строительства тоннеля

Комплексный анализ проведения горно-проходческих работ в конкретных условиях проходки Бескидского тоннеля по оценке параметров основных технологических процессов (скорость бурения шпуров и скважин; степень воздействия буровзрывных работ на состояние устойчивости породных обнажений тоннеля; доработка пород гидромолотом и отбойными молотками) и инженерно-геологического обеспечения проходческих работ (систематическое описание пород в забое, оценка прочности и устойчивости пород, изучение тектонических зон, трещиноватости, блочности) показал, что коэффициент крепости пород доходил до 12 (рис.1, кривая 2). Инженерно-геологическое обеспечение проходческих работ выполнялось лицензированным специалистом-геологом. На каждую заходку (2,4 м) осуществлялся следующий состав работ:

описание пород в забое, свода и стенок выработки;
 оценка прочности и устойчивости пород;
 определение величины водопритока в забой;
 оценка проявления горного давления в своде, стенах, и лотке выработки;
 проверка соответствия инженерно-геологических условий и расчетных показателей физико-механических свойств пород, принятых в проектной документации, с фактическими данными, выявленными во время проведения проходки тоннеля;
 оценка прочностных характеристик пород в «массиве» на основании времени обруивания забоя (скорости бурения шпуров) и удельного расхода ВВ.

При окончательной обработке материалов все исследования и анализы обобщались и составлялся исполнительный инженерно-геологический разрез (рис. 2).

На рис. 2 представлено инженерно-геологическое описание лба забоя с напластованием пород и углами их падения на ПК 16364+25,0 и на ПК16364+29,1 по факту проходки калотты. При расстоянии между пикетами 4,1 м строение лба забоя существенно отличается, что только подчеркивает вышесказанное и говорит о сложных условиях проходки [1], особенностях горного массива, а также о невозможности предоставления детальных результатов инженерно-геологических изысканий до проходки тоннеля, при бурении скважин с гористого рельефа дневной поверхности.

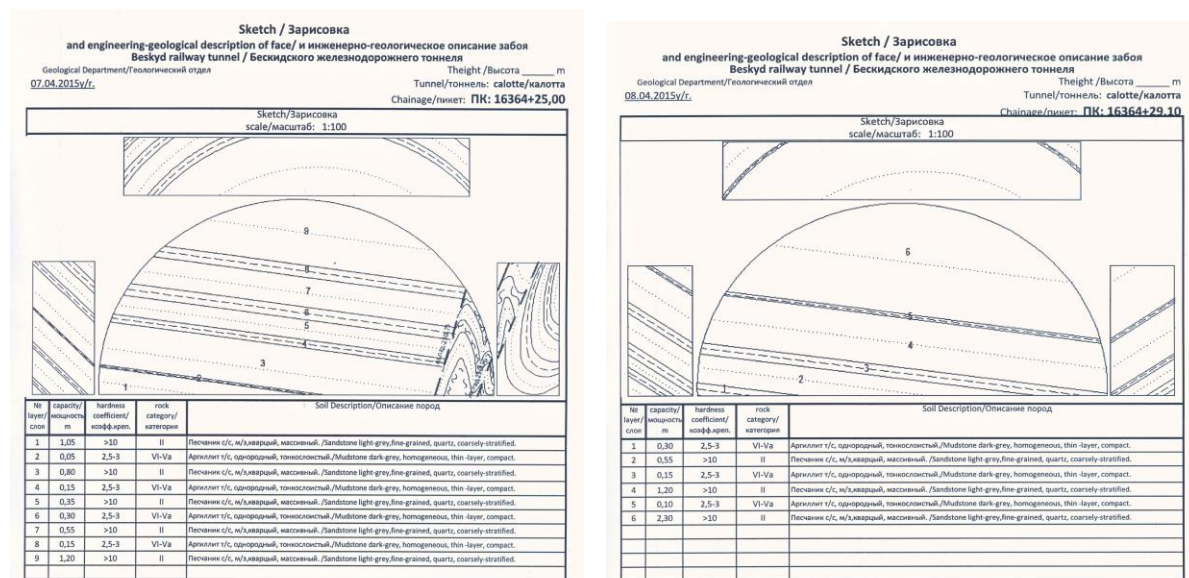


Рис. 2. Инженерно-геологическое описание лба забоя

Из сопоставления данных по крепости пород видно, что стандартизованный метод определения крепости пород дает заниженную оценку, практически по всем диапазонам колебания прочности для рассматриваемых условий. Результаты показывают отсутствие какой-либо взаимосвязи между коэффициентом крепости и прочностью пород на одноосное сжатие, что свидетельствует о недостаточной эффективности стандартизованного метода. Причина состоит в отборе и подготовке проб. При отборе проб керновым бурением, вследствие разгрузки их от напряжений, возникает дополнительная трещиноватость. При подготовке проб к испытаниям, то есть образцы пород с помощью молотка разбиваются до крупности массой (40-60 г), что также приводит к появлению дополнительных трещин [9]. Их наличие в большей мере и оказывает влияние на характеристики пород. Метод основывается на испытаниях «кусков» породы и не характеризует в полной мере свойства его в «массиве». Таким образом, коэффициент крепости пород остается в границах представления о нем, как о прочностной характеристике породы «в куске».

Считаем, что шкала-классификация горных пород по проф. М.М. Протогьяконову [2,7] несовершенна для условий анизотропного геомассива, поскольку классификация не содержит таких характерных для современных условий тоннельного строительства пород, как аргиллиты, алевролиты, различные переуплотненные глины и породы флишевой толщи. Это решение так-

же базирується на факте несоответствия полученных расчетных значений деформации временной крепи тоннеля, полученных методом численного моделирования на основании инженерно-геологического отчета (на стадии «Проектная документация»), и данных деформаций крепи, полученных в процессе натурных измерений в процессе проходки тоннеля.

3. *Подтверждение недостатков стандартизированного метода определения коэффициента крепости горных пород в процессе верификации расчетных деформаций с экспериментальными. Пути решения данной проблемы.*

По мере проходки калотты маркшейдерской службой САИ «Интербудтоннель» выполнялись геодезические измерения деформаций временной крепи калотты с использованием современных высокоточных тахеометров. На рис. 3 показана схема оборудования сечения тоннеля реперами. Точность измерения смещения реперов составляет 1-2 мм. Выполненные измерения позволили оценить период стабилизации горного давления. Так для флишевой толщи песчаников и аргиллитов она составляет 2-3 месяца (рис. 4).



Рис. 3. Расположение деформационных марок (реперов) в сечении калотты

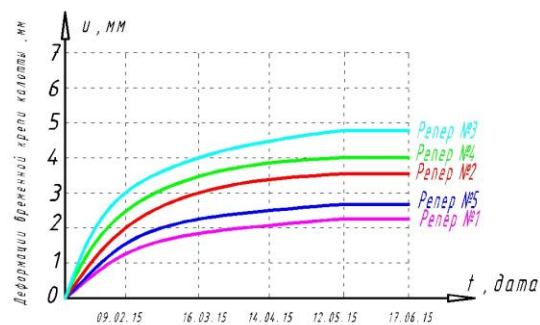


Рис. 4. Динамика деформаций временной крепи калотты на ПК16361+20

Полученные фактические результаты деформаций временной крепи калотты меньше расчетных величин, выполненных методом численного моделирования на основании инженерно-геологического отчета (на стадии «Проектная документация»). Причиной такого результата является занижение коэффициента крепости пород по Протодьяконову в инженерно-геологическом отчете в следствии малого объема испытаний по трассе тоннеля и недостаточной эффективности стандартизированного метода оценки крепости пород (ГОСТ 21153.1-75), описанного в главе №2 данной статьи.

Таким образом, при реализации объекта Бескидский тоннель, проектировщики и строители столкнулись со сложным выбором. С одной стороны - разработка окончательного проекта требовалась по нормативным документам Украины, с другой стороны - в составе договора подряда между «Укрзалізницей» и Подрядчиком, была предложена система классификации горных пород и рекомендации по использованию крепи по системе Q норвежского метода строительства тоннелей. В Украине данная система не применялась. Система Q норвежского метода строительства используется при проектировании временной крепи в различных европейских странах (Австрии, Черногории и других). Использование данной системы в проектах на территории Украины с более усовершенствованным подходом, изложены далее в данной статье.

4. *Применение системы Q норвежского метода строительства при проходке Бескидского тоннеля совместно с современными методами определения прочностных и деформационных характеристик анизотропных пород.*

На сегодняшний день в мировой практике существует более современный подход к классификации горных пород - норвежский метод (NTM). При участии Норвежского геотехнического института выполнено подробное геологическое картографирование и классификация пород и на этой основе предложен метод Q -тестирования.

Для оценки качества породного массива и выбора соответствующей крепи выработки используются эмпирической системой Q , основанной на классификации RQD (Rock Quality Determination) (рис. 5).

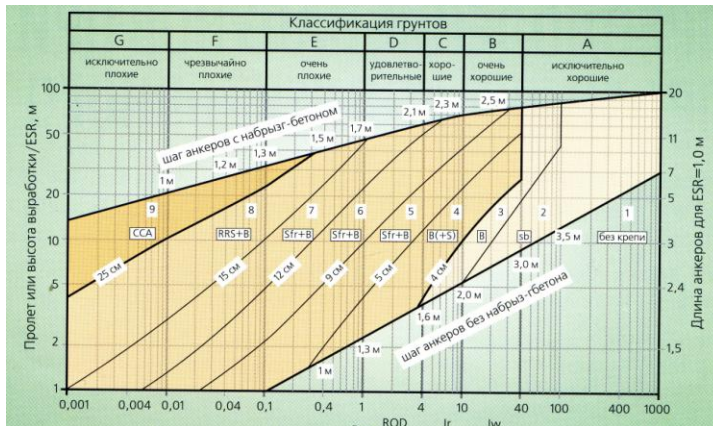


Рис. 5. Q-система норвежского метода строительства тоннелей: 1 - без крепления; 2 - одиночные анкера; 3 - система анкеров; 4 - набрызг-бетон, система анкеров; 5-7 - армированный стальными фибрами набрызг-бетон, система анкеров; 8 - армированный стальными фибрами набрызг-бетон, система анкеров, арматурные арки; 9 - опережающая крепь, армированный стальными фибрами набрызг-бетон, система анкеров, арматурные арки

В соответствии с классификацией *RQD* качественное состояние породного массива определяют по выходу керна при бурении скважин

(оно тем выше, чем больше выход керна, следовательно, меньше нарушенность пород трещинами и пустотами).

К этому показателю добавляются пять параметров, характеризующих степень трещиноватости породного массива J_n , материал заполнения трещин J_r , характеристики несвязного геомассива и условия на контакте «крепь-породный массив» J_a , степень обводненности и давление воды J_w , начальное напряженное состояние массива SRF . Каждый из этих параметров имеет от 10 до 17 количественных показателей.

Величина Q определяется по формуле

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Значения Q могут быть от 0,001 для пород исключительно ослабленных, с высоким градиентом начального поля напряжений, до 1000 - для крепких скальных породных массивов, не имеющих трещин.

Для принятия решений по конструкции крепи величина пролета или высота выработки корректируется делением на показатель *ESR* (см. рис. 3). Эта величина принимается в зависимости от уровня эксплуатационной безопасности подземного сооружения. Для автодорожных и железнодорожных тоннелей на магистральных трассах ее значение рекомендуется принимать 0,9-1,1 [10,11].

Таким образом, нами был предложен (опробован) метод детализации инженерно-геологической ситуации (метод диагностики породного массива впереди выработки) непосредственно из забоя в ходе проходческих работ бурением опережающей разведочно-горизонтальной скважины малого диаметра параллельно оси тоннеля.

Бурение осуществлялось колонковым способом с помощью бурового станка типа «Диамек-250». Диаметр выбуриваемого керна - 38 мм. Длина выбуриваемого за рейс - 3 м. Протяженность скважин составляла около 120 м.

По выбуренным кернам определялся показатель степени нарушенности скальных пород по методу *RQD* (отношение суммы ненарушенных кусков керна длиной 10 см и более к длине исследуемого интервала скважины, %), который находился в пределах 50-75 %.

При этом были получены результаты, позволяющие расширить физические представления о горных породах как в целом, так и о влиянии физико-механических процессов на состояние устойчивости горных выработок и их крепи в частности. Тем самым предполагалось повысить точность определения строения породного массива в зоне проходки тоннеля, а также с большей вероятностью выявить зоны тектонических нарушений (по пикетам).

Главным достоинством опережающего разведывательного бурения являлась возможность корректирования типов временной крепи в процессе проходки и проводить анализ расчетов на конкретных пикетах, выполненных до начала проходки тоннеля.

Так на основании уточненных характеристик флишевой толщи массива были выполнены поверочные расчеты (на стадии проходки тоннеля), позволяющие исключить опережающий экран из труб на участке предполагаемой в рабочей документации.

Среди наиболее значимых моментов следует выделить также определение отдельных разрушенных зон и зон повышенной трещиноватости пород.

Поверочные расчеты (на стадии проходки тоннеля) по уточненным характеристикам мас-

сива дали результаты приближенные к натурным (обозначенные на рис. 4).

Сопоставление показало, что при применяемой технологии и конструкции временной крепи большую роль оказывают исходные данные инженерно-геологических условий, включаемых в расчет и модели горного массива, используемые в документе [17] или в других руководствах к геотехническим программным комплексам.

Для отражения реальной работы крепи подземных сооружений с горным массивом (их общая деформация) в условиях флишевого сложения, авторами был предложен принципиально новый подход к определению параметров конструкции временной крепи тоннелей, проходка которых выполняется горным способом. Подход базируется на использовании (по порядку выполнения алгоритма расчета):

q - системы норвежского метода строительства тоннелей;

современных автоматизированных лабораторных комплексов (ИВК-АСИС, разработанный в ООО «НПП Геотек») с трехосными приборами (стабилометрами) для определения параметров усовершенствованных моделей горных пород;

новых возможностей моделирования испытаний пород в виртуальной лаборатории (ВИП) с помощью дополнительных опций геотехнических программных комплексов, основанных на методе конечных элементов (Plaxis, Midas, Phase2 и другие) [17];

совершенствованных моделей горных пород (модель трещиноватой скальной породы Jointed Rock Mass model, модель Хэка-Брауна HB model, реализованные в геотехнических программах) [17].

Выводы и направления дальнейших исследований. Использование коэффициента крепости пород в нормативных документах на проектирование и строительство в качестве основной характеристики при расчетах подземных сооружений, не отвечает современным требованиям подземного строительства и современным классификациям пород.

Исключение из нормативных документов положений, связывающих нагрузки на обделки от давления скальных, полускальных пород с понятием их «крепости», обеспечит взаимопонимание украинских специалистов с зарубежными коллегами и соответствие наших и зарубежных норм по назначению нагрузок от горного давления при проектировании тоннелей.

Предлагается новый алгоритм расчета временной крепи, позволяющий приблизиться к реальной оценке НДС горного массива вокруг выработки, определить состояние устойчивости породных обнажений и параметров крепи, а именно:

выполнить на стадии инженерно-геологических изысканий керновое бурение с определением RQD, степени трещиноватости породного массива, материала заполнения трещин, степени обводненности и т.д. Определить параметр Q . Согласно рис. 5 определить основные параметры конструкции временной крепи;

отобрать пробы пород (выбрать керн) и провести лабораторные испытания на трехосное сжатие с определением всех необходимых параметров;

в программе виртуальной лаборатории Soil Test (встроенная в состав программы «Plaxis»), моделирование виртуальных испытаний пород и выполнить коррекцию полученных лабораторных данных. Изменить эти данные так, чтобы поведение математической модели совпадало с поведением лабораторного образца. Принять скорректированные данные за основу;

ввод полученных данных в выбранную усовершенствованную модель пород;

выполнить расчет в геотехнической программе, основанной на методе конечных элементов (МКЭ), с использованием конструктивных особенностей временной крепи, определенных с помощью Q -системы (пункт «а» данного алгоритма).

Определение усилий в конструкции временной крепи и в анкерах с учетом технологических параметров (длины строительной заходки, отставания временной крепи от лба забоя, времени обнажения контура выработки и т.п.).

Особенности данного расчета подробно излагается в источнике [16].

Описанные в этой статье принципиально новые и существенные аспекты позволили создать внутренние рекомендации организации ПИ «Укрспецгоннельпроект» (генерального проектировщика объекта Бескидский тоннель) для дальнейшего использования этих проектных решений в аналогичных условиях.

Предложенная в статье система классификации горных пород по системе Q , учитывает нарушенность пород трещинами и пустотами, обводненность, материал заполнения трещин и

т.д., что дает представление о «массиве» флишевой толщи, по сравнению с классификацией пород по Протодьяконову, которая остается в границах представления, как о прочности характеристики пород «в куске».

Геологоразведка в сочетании с непосредственными инструментальными наблюдениями в забое тоннеля фактических деформаций и сложного фактического поля напряжений в геомассиве, обусловленного как гравитационными, так и тектоническими силами, дала возможность разработать новые аспекты, которые, может быть в будущем, будут отмечены в новых нормативных документах Украины.

Список литературы

1. Научно-технический отчет о результатах комплексных инженерных изысканий. Строительство Бескидского тоннеля. ГП «Энергопроект», Киев – 2012 год.
2. **Протодьяконов М.М.** Давление горных пород и рудничное крепление, ч.1. Гос. научн-техн. горное изд-во, М., 1933.
3. **Цимбаревич П.М.** Механика горных пород. М., Углетехиздат, 1934.
4. ВСН 126-90. Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Нормы проектирования и производства работ.
5. **Ильницкая Е.И.** и др. Свойства горных пород и методы их определения. М., «Недра», 1969.
6. **Барон Л.И.** Коэффициенты крепости горных пород. М., «Наука», 1972.
7. СНиП II-44-78. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Нормы проектирования, 1978.
8. СНиП III-44-77. Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. Правила производства и приемки работ.
9. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову.
10. **Баргон Н., Лин К., Лунде Й.** Инженерная классификация пород, используемая для проектирования тоннельной крепи. Rock Mech; 6(4):189- 236., 1974
11. **Баргон Н.** Некоторые новые корреляции Q-значения в поддержку характеристики площадки и проектирования тоннелей. Международный журнал по механике горных пород и горному делу.39-2. Стр.185-216, 2002.
12. **Бенявски З.Т.** Определение деформируемости породного массива: опыт примеров применения. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr ; 15: 237-247, 1978.
13. **Бенявски З.Т.** Инженерные классификации породных массивов: полное руководство для горных инженеров и геологов, строительства и нефтепромышленного дела. Нью-Йорк: Вайли, 251с, 1989.
14. **Лунард П.** Проектирование и строительство тоннелей с применением подхода, основанного на анализе контролируемой деформации в породах и грунте (ADECO-RS). «T&T Международный подход по анализу контролируемой деформации в породах и грунте (ADECO-RS)», 2000.
15. **Маринос П, Хок Е.** Оценка геотехнических свойств гетерогенных породных массивов, таких как флиш. Бюллетень по инженерной геологии и окружающей среде. 60 (2001) 85-89, 2001.
16. **Стовпник С.Н., Осипов А.С.** «Оптимизация комбинированной конструкции временной крепи тоннелей для сложных инженерно-геологических условий флишевого сложения массива пород», Вісті Донецького гірничого інституту - Красноармейск, 2016 – Выпуск №1(38), - с.105-114.
17. Plaxis 3D. Руководство пользователя. Часть 3. Пособие по моделям материалов, «НИП-Информатика», Санкт-Петербург, 2012 год.

Рукопись поступила в редакцию 17.03.17

УДК 622.235:622.271

А.А. СКАЧКОВ, горный инженер, начальник департамента технологий и планирования производства «ГДД МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»

С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОМ ЭНЕРГОНАСЫЩЕНИИ ПОРОДНОГО МАССИВА

В статье анализируются геомеханические условия, при которых взрывное разрушение кристаллических пород осуществляется посредством взаимодействующих скважинных зарядов. Также учитываются особенности формирования четырех зон вокруг заряда с различным напряженным состоянием горных пород.

Цель. Основной целью исследования является определение наиболее значимых факторов, влияющих на свойства горных пород при формировании в них силовых полей. И он посвящен решению актуальной проблемы – снижению удельного расхода взрывчатых веществ для разрушения горных пород путем изменения порядка выполнения работ при их подрывании. Это учитывает взаимодействие взрывных нагрузок от разных зарядов.

Методами исследования являются анализ геологических данных по железорудным месторождениям Кривбас-