

УДК 624.191.22

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ ЗАБОЯ ВЫРАБОТКИ К ЭКСПЛУАТИРУЕМОМУ ТОННЕЛЮ В УСЛОВИЯХ ФЛИШЕВОГО СЛОЖЕНИЯ ПОРОД

Обоснован новый подход к расчёту крепи подземных выработок во флишевом сложении геомассива. Дано решение задачи безопасной эксплуатации действующей подземной выработки при ведении горнопроходческих работ в непосредственной её близости. Приведены результаты расчётно-теоретических исследований, позволяющие выполнить анализ влияния горнопроходческих работ на напряженно-деформированное состояние (НДС) крепи эксплуатируемой выработки. Предложенная методология расчёта крепи подземной выработки позволяет получить полную и объёмную картину НДС как строящейся выработки, так и крепи вблизи эксплуатационного тоннеля и, в случае необходимости, оперативно вносить конструктивные и технологические изменения в разработанную базовую модель для её корректировки в процессе строительства. Технические решения, принятые на основе расчётно-теоретических исследований по данной методологии, позволяют обеспечить как безопасность горнопроходческих работ, так и эксплуатационную надёжность действующей подземной выработки.

Substantiation of a new approach to calculating the support of underground excavations in a flyslide addition of a geomass. Solution of the problem of safe operation of the existing underground mine while conducting mining operations in its immediate vicinity. The results of theoretical and theoretical studies allow performing the analysis of the influence of mining works on the stress-strain state (SSS) of the support of the developed work. The proposed methodology for calculating the support for underground mining allows one to obtain a full and volumetric picture of the SSS of both the construction of the output and the SSS to be attached to a number of operational tunnels and, if necessary, to promptly make structural and technological changes to the developed base model for its adjustment during construction. Technical decisions made on the basis of theoretical and theoretical studies on this methodology allow to ensure both the safety of mining operations and the operational reliability of the existing underground mine.

Ключевые слова: Бескидский тоннель, сбойки, НДС обделки тоннеля и геомассива, мониторинг, численный анализ, ПК Plaxis, «массив–технология строительства–крепь» («М–ТС–К»).

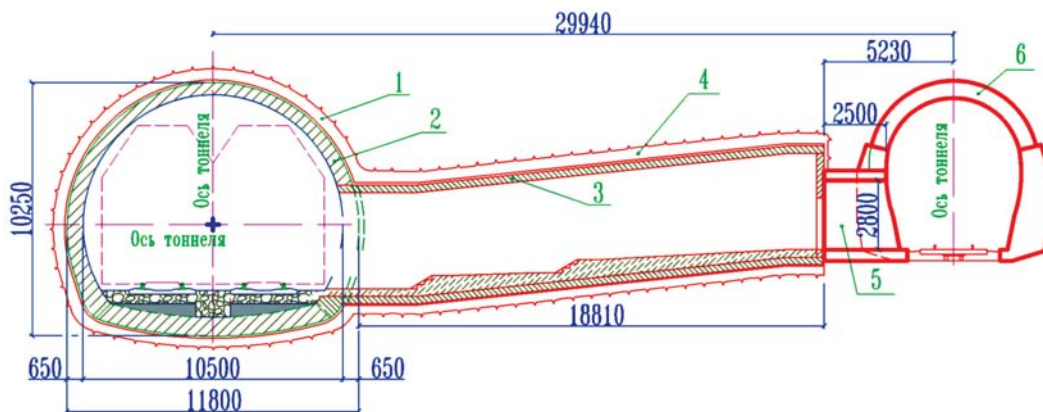
Знание характеристик напряженно-деформированного состояния горных пород в массиве имеет большое значение для обеспечения безопасных условий строительства и эксплуатации подземных сооружений, особенно это важно в тоннелестроении. Проходка тоннелей, как правило, осуществляется в сложных инженерно-геологических условиях гористого рельефа местности и, по этой причине, недостаточной изученности условий строительства в целом. В первую очередь это касается геомеханических условий, определяющих состояние устойчивости породных обнажений, параметры крепи сооружений и их эксплуатационную безопасность.

Особенно актуально это при раскрытии выработки вблизи действующих эксплуатируемых тоннелей, когда остановка движения железно-


О.С. Осипов

инженер проектного института «Укрспецтоннельпроект», аспирант кафедры «Геостроительство и горные технологии» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

дорожного транспорта невозможна. Характерным примером в этом отношении является строительство эвакуационных сбоек между строящимся двухпутным железнодорожным Бескидским тоннелем и эксплуатируемым однопутным железнодорожным тоннелем, построенным в 1886 г., являющимся единственным на перегоне между станциями «Бескид» – «Скотарское» (рис. 1).


Рис.1. Конструкция эвакуационной сбойки:

- 1 – временная крепь строящегося тоннеля;
- 2 – постоянная обделка строящегося тоннеля;
- 3 – постоянная обделка строящейся сбойки;
- 4 – временная крепь строящейся сбойки;
- 5 – камера существующего тоннеля;
- 6 – существующий тоннель

Инженерно-геологические условия в зоне проходки эвакуационных сбоек классифицируются как сложные. Все три сбойки разрезают флишевую толщу, которая характеризуется наслоением аргиллитов и алевролитов с чередованием песчаников. Из-за высокой трещиноватости флишевая толща имеет повышенный уровень анизотропности. Инженерно-геологическая ситуация более детально описана в статье [1].

Принимая к сведению все факторы геологических условий и учитывая, что действующий железнодорожный тоннель попадает в зону влияния сооружаемых сбоек, нами были приняты жесткие требования к минимизации степени влияния проходки сбоек на эксплуатационные качества действующего тоннеля.

Для оценки технического состояния эксплуатируемого тоннеля был проведен комплекс работ, включающий:

- анализ результатов предыдущих обследований;
- визуальное обследование обделки с составлением дефектных карт;
- определение прочностных характеристик материалов обделки.

На основании проведенного обследования было установлено следующее:

1. Сечение тоннеля подковообразное, обделка выполнена из природного камня (песчаника) на цементно-песчаном растворе. Обделка разделена деформационными швами на 177 колец, которые пронумерованы. Длина каждого кольца составляет 9,8 м. Толщина обделки 850–900 мм.

2. Дефекты тоннельной обделки представлены слабой кладкой, выпиранием и вывалами в стенах и своде, отсутствием обратного свода, несоответствием габариту С, обводненностью тоннеля. Система дренажных штолен, сооруженная в 60-е годы, в настоящее время не обеспечивает отведение подземных вод. Проходка дренажных штолен и разборка обратного свода привели к расширению толщи горных пород уменьшенной прочности.

По результатам обследования технического состояния тоннель признан дефектным.

Для обеспечения эксплуатационной надежности железнодорожного тоннеля в процессе проходки сбоек были намечены следующие мероприятия для решения данной проблемы:

- выполнение расчетно-теоретических исследований по форме, площади сечения выработки (сбойки) и технологии проходки;
- установление пороговых значений прочностных и деформационных параметров конструкции;
- определение НДС обделки тоннеля в условиях ее работы, близких к реальным;
- осуществление мониторинга НДС обделки тоннеля в процессе проходки сбоек.

На первом этапе расчетно-теоретических исследований были определены предельные значения напряжений и деформаций в обделке действующего тоннеля, при которых технический уровень конструкции снизится до ограниченно работоспособного. Они были определены по результатам анализа статической работы конструкции на заданные ожидаемые перемещения, возникающие в геомассиве в процессе его разгрузки при подходе забоя сбойки к обделке существующего тоннеля. Анализ проводился методом конечных элементов с применением программного комплекса «Plaxis».

Физико-механические характеристики горного массива и материалов обделки в расчетной модели были приняты близкими к реальным, полученным по данным инженерно-геологических изысканий и по результатам обследования. Переход от предела прочности на одноосное сжатие образцов породы (в лаборатории) к значениям параметров сжатия и растяжения в скальном массиве выполнялся с использованием геологического индекса прочности (GSI), приведенного в работе (Ноек, 1999), а также в работе [2]. Данный индекс является основным параметром эмпирического критерия разрушения скальных грунтов Хоека-Брауна [2, 3].

Для моделирования обделки использовались объемные линейно-эластичные элементы, для вмещающего грунтового массива – объемные элементы по модели пластического деформирования Мора-Кулона. Необходимые расчетные параметры модели определялись из диаграммы наибольших кругов напряжений (паспорта прочности горного массива).

Все элементы, моделирующие конструкцию обделки и грунтовый массив, – весомые.

Значения допустимых деформаций обделки установили по величинам, при достижении которых в обделке возникали растягивающие напряжения, а сжимающие приближались к

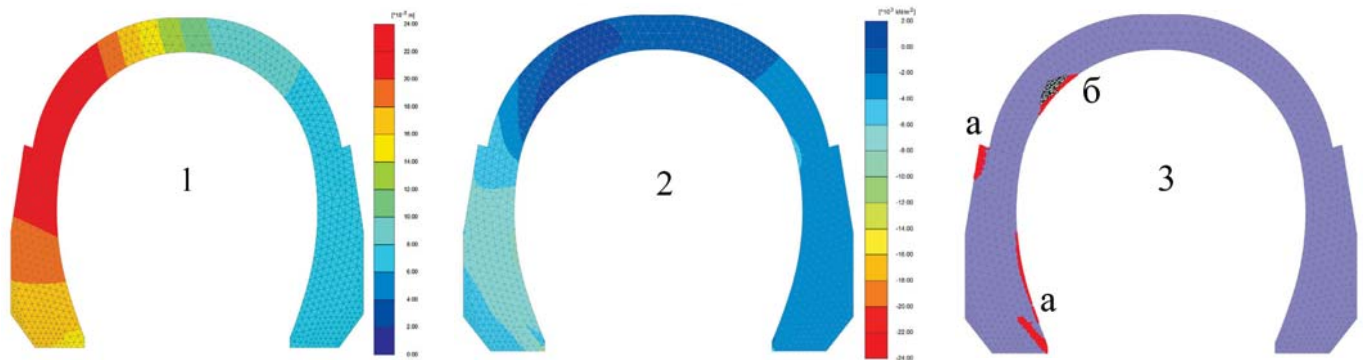


Рис. 2. Распределение главных напряжений в обделке эксплуатируемого тоннеля при максимальных деформациях $|u| = 0,023$ м:

1 – общие перемещения обделки существующего тоннеля, мм; 2 – напряжения, kH/m^2 ; 3 – точки напряжений в пластическом состоянии; а – красный кубик (точка разрушения) – напряжения имеют место на поверхности огибающей разрушения Кулона; б – белый кубик (точка Tension cut-off) – показывает, что был применён критерий ограничения области растяжения

Таблица 1

Результаты расчёта напряженно-деформированного состояния обделки существующего тоннеля на заданные перемещения

Ожидаемые (заданные) перемещения приконтурного геомассива, мм	Максимальные деформации обделки, мм			Максимальные напряжения (сжимающие/растягивающие), МПа		
	Свод	Левая стенка	Правая стенка	Свод	Левая стенка	Правая стенка
1–5	2	3	1	-2,8	-5,2	-4,7
2–10	4	7	2	-2,7	-5,5	-4,8
3–15	6	10	4	-2,6	-5,9	-4,9
4–20	6	13	6	-2,5	-6,3	-5,0
5–25	10	17	8	-2,4/+0,3	-6,8	-5,1
6–30	12	20	10	-2,3/+0,5	-7,6	-5,2
7–35	14	23	12	-2,2/+0,7	-8,1	-5,3

пределу прочности на сжатие кладки. Численный анализ НДС обделки, проведенный в процессе кососимметричного приложения перемещений приконтурного массива по линии наибольшего ожидания, показал, что максимальные значения деформаций обделки, при которых в её своде возникнут напряжения, близкие к предельно допустимым, должны находиться в пределах 20 мм. При превышении этой величины в своде возникнут растягивающие напряжения, а сжимающие напряжения в левой стене (со стороны подходящей выработки) приблизятся к пределу прочности на сжатие кладки (рис. 2). Результаты расчета напряженного состояния обделки тоннеля на заданные перемещения представлены в таблице 1.

На следующем этапе моделирования был выполнен численный анализ степени влияния проходки сбоек на НДС обделки железнодорожного тоннеля. С этой целью составлены результаты моделирования НДС обделки железно-

рожного тоннеля по 5-ти вариантам расчетных схем, в зависимости от местоположения забоев тоннеля и сбоек:

- 1) до проходки двухпутного ж.д. тоннеля;
 - 2) после проходки двухпутного ж.д. тоннеля;
 - 3) при расстоянии от забоя сбойки до действующего тоннеля 16 м;
 - 4) при расстоянии от забоя сбойки до действующего тоннеля 8 м;
 - 5) при сопряжении сбойки с действующим ж.д. тоннелем (образовании сквозной выработки).
- Варианты расчётных схем представлены на рис. 3.

Для решения задачи безопасной эксплуатации действующей подземной выработки (однопутного ж.д. тоннеля) при ведении горнопроходческих работ в непосредственной её близости предложена методология расчёта конструкции временной крепи сооружаемой выработки (сбойки) и определение НДС обделки эксплуатируемого тоннеля на основе единой

Таблица 2

Результаты численного анализа влияния проходки выработок на НДС обделки существующего однопутного ж.д. тоннеля

№ расчётной схемы	Напряжения, мПа, в сечениях обделки (наружный контур/внутренний контур)				
	Сечение				
	а	б	в	г	д
1	-3/-1,6	-4,3/-2,5	-4,3/-2,5	-5,0/-2,5	-5,0/-2,5
2	-3/-1,6	-4,3/-2,5	-4,3/-2,5	-5,0/-2,5	-5,0/-2,5
3	-3/-1,6	-4,3/-2,5	-4,8/-2,5	-5,1/-2,6	-5,3/-2,8
4	-3,2/-1,8	-4,8/-2,6	-5,2/-2,9	-5,2/-2,9	-5,4/-3,2
5	-3,4/-2,0	-5,3/-2,8	-7,0/-4,2	-5,7/-3,4	-7,5/-5,0

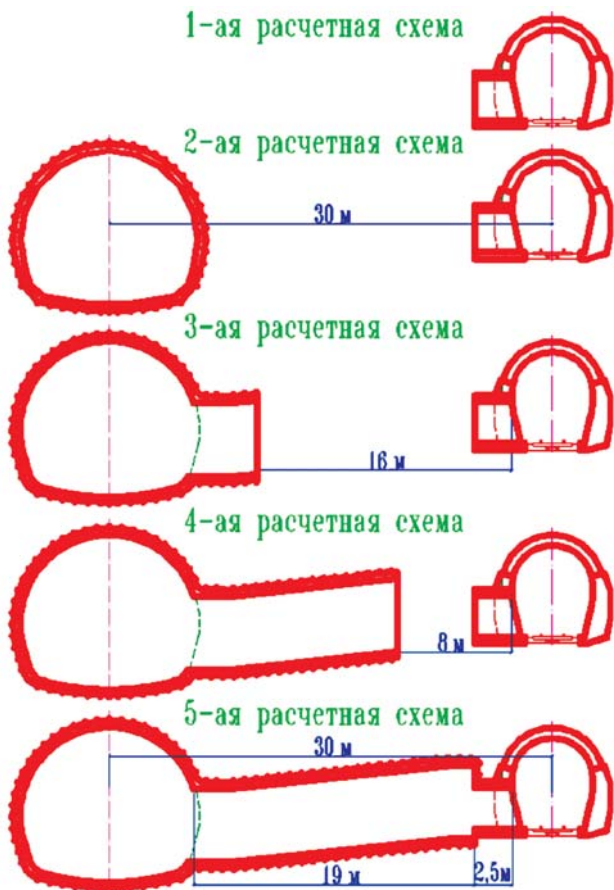
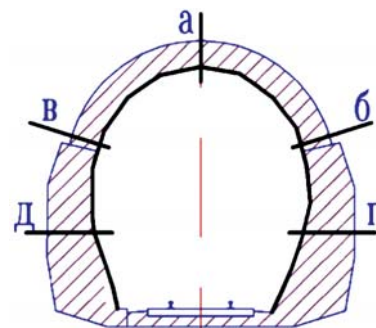


Рис. 3. Варианты расчётных схем



системы «массив–технология строительства–крепь» («М–ТС–К») и моделирования с учётом временного фактора (последовательности строительства). Из рассматриваемой системы «М–ТС–К» наибольшее влияние на формирование НДС обделки эксплуатируемого тоннеля оказывает технология строительства сбоек. На графике (рис. 4) показано развитие напряжений по мере подхода сбойки к эксплуатируемому тоннелю (от расчётной схемы № 1 до расчётной схемы № 5).

Формирование НДС обделки происходит в зависимости от технологических этапов (схем). Кроме того распределение напряжений в сечении обделки также не равномерно – более нагруженными оказываются стены, расположенные по направлению к подходящей выработке.

Результаты численного анализа (табл. 2) позволили сделать вывод о том, что проходка эвакуационных сбоек между строящимся двухпутным и действующим однопутным железнодорожным тоннелями не окажет существенного влияния на НДС обделки эксплуатируемого тоннеля.

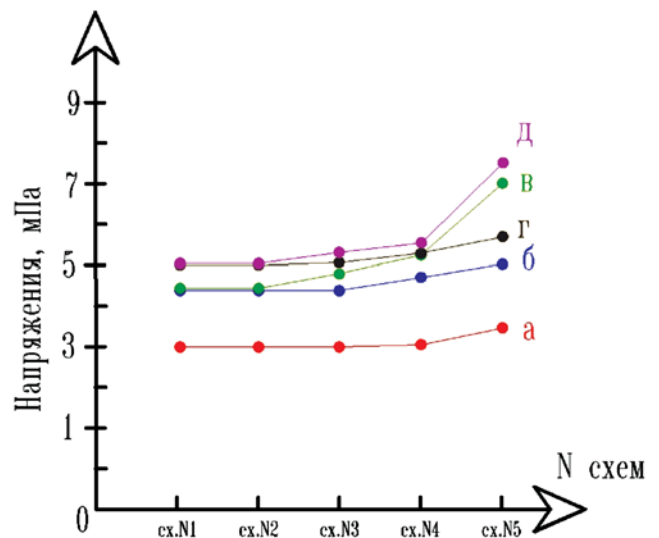


Рис. 4. График формирования напряжений в обделке эксплуатируемого тоннеля

По результатам таблицы 2 построен график формирования напряжений в обделке эксплуатируемого тоннеля (см. рис. 4).

Установлено, что на всех этапах строительства материал обделки однопутного тоннеля испытывает только сжимающие напряжения.

Максимальное значение деформаций зафиксировано расчётом в шельге свода эксплуатируемого тоннеля и составляет 6 мм, что не превышает ранее установленного предельно допустимого значения, равного 20 мм. При этом максимальные сжимающие напряжения 7,5 мПа не превышают предел прочности кладки на сжатие.

С целью постоянного контроля степени влияния строительства на техническое состояние эксплуатируемого тоннеля маркшейдерской службой «Интербудтуннель» был осуществлен постоянный мониторинг в процессе проходки сбоек.

Задача мониторинга – оперативная и регулярная информация о возможных изменениях напряженно-деформированного состояния (НДС) обделки тоннеля.

Программа мониторинга предусматривала следующие этапы: подготовительный период; постоянный мониторинг НДС обделки; анализ технического состояния тоннельной обделки в зависимости от продвижения забоя сбойки.

В подготовительный период в местах трещин обделки устанавливались деформационные «маяки», прокладывались теодолитные и нивелировочные ходы, закладывались базовые реперные знаки геодезической основы, крепились к обделке деформационные марки и датчики перемещений, снимались первичные отчеты измерительной системы.

Для наблюдения за проявлениями возможных деформаций обделки тоннеля использова-

ли современные высокоточные тахеометры. Показания снимались три раза в сутки. Схема установки деформационных марок в эксплуатируемом тоннеле при проходке сбоек приведена на рис. 5.

При анализе технического состояния тоннеля полученные данные по смещению деформационных марок сравнивались с допустимыми деформациями обделки.

Сравнению подлежали усредненные суточные показания.

Предполагалось, что в случае превышения предельно допустимых значений деформаций работы останавливаются, разрабатываются дополнительные мероприятия по технологии проходки сбоек или усилению обделки тоннеля.

Постоянный мониторинг проводили в зоне влияния нового строительства на обделку действующего тоннеля в течение всего срока проходческих работ и еще 6-ти месяцев после возведения постоянной обделки сбоек.

За период мониторинга максимальные смещения деформационных марок не превышали 10 мм. При этом 90 % их находились в пределах интервала 5–6 мм.

Результаты мониторинга свидетельствуют о том, что в процессе горнопроходческих работ при сооружении сбоек обделка однопутного тоннеля постоянно находилась в условиях всестороннего сжатия. При этом максимальные смещения обделки составили 50 % от предельно допустимых, определенных в результате численного анализа.

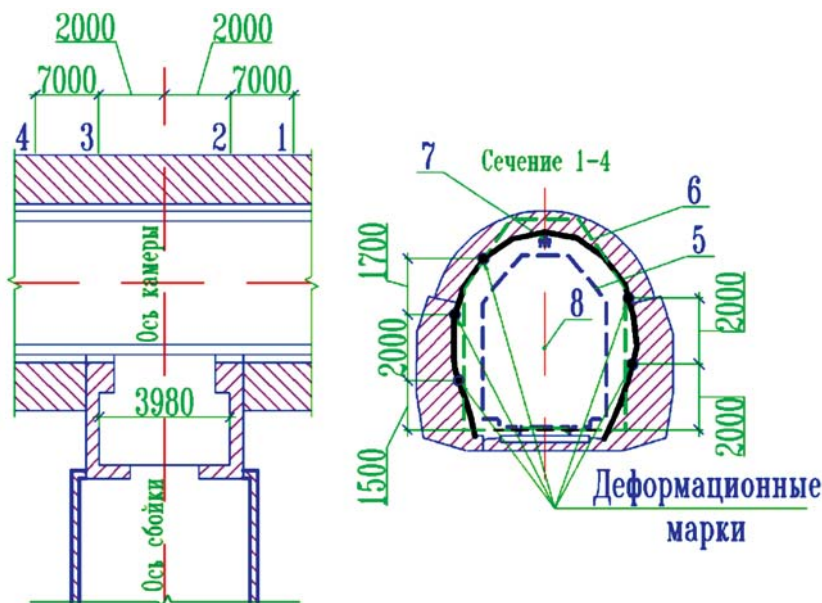


Рис. 5. Схема расположения деформационных марок геодезического мониторинга:

1, 2, 3, 4 – номера сечений, где установлены деформационные марки; 5 – габарит приближения подвижного состава Т; 6 – габарит приближения строений С; 7 – контактный провод; 8 – ось существующего тоннеля

Таким образом, принятые конструктивно-технологические решения на основе расчетно-теоретических исследований, реализованные при проходке эвакуационных сбоек, обеспечили как безопасность производства горнопроходческих работ, так и эксплуатационную надежность действующего железнодорожного тоннеля.

Выводы.

Рассмотренный в данной статье подход к оценке НДС горных пород в условиях их естественного залегания служит реальной основой для оценки качества проходческих работ в сложных инженерно-геологических условиях, и, прежде всего, в условиях близко расположенных эксплуатируемых подземных выработок.

Решение геомеханической задачи на основе предлагаемого подхода наиболее эффективно

с помощью численного моделирования методом конечных элементов, позволяющим учесть этапность строительства сбоек.

Предложенная методология расчёта конструкции временной крепи [1] и влияния проходки на эксплуатируемый тоннель с учётом технологии строительства позволяет получить полную информацию об объекте проектирования и эксплуатации (НДС, деформации).

Достаточным доказательством работоспособности рассматриваемого метода оценки НДС породного массива служат натурные данные деформаций обделки эксплуатируемого тоннеля при сооружении эвакуационных сбоек (3 шт) между строящимся двухпутным Бескидским железнодорожным тоннелем и действующим однопутным железнодорожным тоннелем в условиях флишевого сложения геомассива.

- [1] *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.
- [2] *М.Г. Зерцалов* «Механика грунтов» (введение в механику скальных грунтов), Издательство Ассоциации строительных вузов, Москва, 2006 год.
- [3] Plaxis 3D. Руководство пользователя. Часть 3. Пособие по моделям материалов, «НИП-Информатика», Санкт-Петербург, 2012 год.
- [4] Научно-технический отчёт о результатах комплексных инженерных изысканий. Строительство Бескидского тоннеля. ГП «Энергопроект», Киев – 2012 год.
- [5] ВСН 126-90. Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Нормы проектирования и производства работ.
- [6] СНиП II-44-78. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Нормы проектирования, 1978.
- [7] СНиП III-44-77. Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. Правила производства и приемки работ.
- [8] *Бартон Н, Лин К, и Лунде Й.* Инженерная классификация пород, используемая для проектирования тоннельной крепи. Rock Mech; 6(4):189–236., 1974.
- [9] *Бартон 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.
- [10] *Лунарди 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.
- [11] *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.
- [12] *Булычев Н.С.* «Механика подземных сооружений», Москва, «Недра» 1994 год.
- [13] *Булычев Н.С.* «Механика подземных сооружений в примерах и задачах», Москва, «Недра», 1989 год.
- [14] *Баклашев И.В.* «Геомеханика», Том 1. Основы геомеханики, Москва, Издательство Московского Государственного Горного Университета, Высшее Горное образование, 2004 год.
- [15] *Баклашев И.В.* «Геомеханика», Том 2. Геомеханические процессы, Москва, Издательство Московского Государственного Горного Университета, Высшее Горное образование, 2004 год.

Надійшла 17.10.2017