

УДК 624.191.22

ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛИШЕВОГО ПОРОДНОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА БЕСКИДСКОГО ТОННЕЛЯ

Объектом исследования данной статьи является флишевый породный массив зоны строительства Бескидского тоннеля. Предметная область – изучение инженерно-геологических условий и геотехнических характеристик пород с целью обобщения и последующей оценкой степени их стабильности при проходке тоннеля и сбоек, а также прогнозирование развития опасных геотехнических процессов.

The object of investigation of this article is the flysch rock massif of the zone of construction of the Beskyd Tunnel. The subject area is the study of engineering and geological conditions and geotechnical characteristics of soils for the purpose of generalization and subsequent assessment of the degree of rock stability during tunneling and failure, and forecasting the development of hazardous geotechnical processes.

Ключевые слова: Бескидский тоннель, геология Карпат, флишевая толща, геолого-геотехническая модель, анизотропный геомассив, деформационные и прочностные характеристики горных пород.

Участок строительства тоннеля географически входит в состав Северо-восточных Карпат, а с геологической точки зрения расположен на внешнем карпатском флишевом поясе. Геология участка района Бескид представляет собой часть Силезийского (Кросненского) флишевого покрова (складки) и на северо-востоке пересекается с Покровом Сколет. Силезийский покров образует глубоко пересеченную зону Карпатского массива с толстыми отложениями Олигоцена (Верхнего Палеоцена) и сложен из нескольких вытянутых «ломтей», каждый из которых состоит из узких антиклинальных и довольно широких синклинальных складок.

Отложение называется «Кросненским (или Кросно) нижним пластом». Литология местности состоит из песчаника, грубых сланцевых песчаников, серых и темно-серых аргиллитов. Глинистый известняк встречается реже.

Скалы из осадочных пород образовались в Нижнем и Среднем Олигоцене Силезийского бассейна. В этом бассейне в течение длительного времени, возможно благодаря мутным потокам, формировались толстые отложения флиша. В Силезийском бассейне они начинаются из темно-коричневых горючих сланцев и кремнистого известняка (напластование Мелинита), местами – с конусами выноса песчаника. Выше сланцы Мелинита постепенно изменяются разрезами слюдяного и известнякового песчаника и серого глинистого известняка (Кросненский пласт). Как правило, эти разрезы суживаются ближе к горе. Нижняя часть Кросненского разреза имеет вид комплекса толстых напластований песчаника, которые выше переходят в средние и тонкие пласты песчаника и серого глинистого известняка, который образует



С.Н. Стовник

заведующий кафедрой геоинженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», к.т.н.



А.С. Осипов

инженер ПИ «Укрспецтоннельпроект», аспирант кафедры геоинженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

верхнюю часть Кросненских напластований, представляющих собой окончание флишевых разрезов Внешних Карпат. Тектонические движения в период раннего Миоцена привели к образованию складок и наслоений осадочных пород бассейна и обусловили появление нескольких покровов (соответственно: Бедаеталь, 1963; Джулинский, 1996; Ксяжкевич, 1977; Ксяжкевич, 1962 и Ожипко, 1992).

Новейшими исследованиями установлено, что Кросненский покров (зона) состоит, преимущественно, из олигоценово-миоценовых отложений, а мело-палеогеновые образования здесь выходят на поверхность только на ограниченных участках (рис. 1).

Исследования состава и строения флишевой толщи по трассе тоннеля проводились Центральной лабораторией ПАТ «Укргеолбудм» (г. Киев) и лабораторией Львовской геологоразведочной экспедиции на основании пробуренных горизонтальных разведочных скважин с отбором образцов керна (рис. 2).

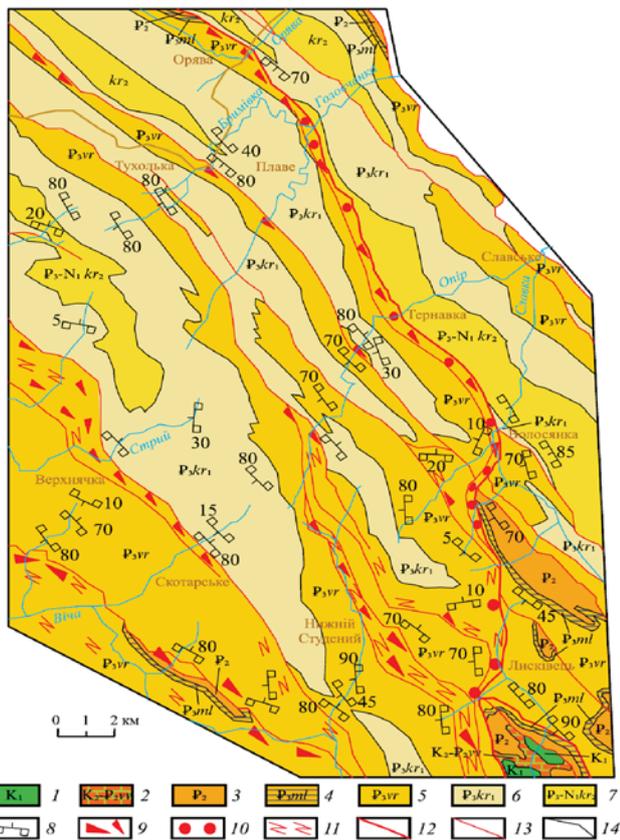


Рис. 1. Геологическая карта восточной части Кросненского покрова в бассейнах верхнего течения рек Стрий, Опир, Вича, Рика (составил О.М. Гнилко)

1 – нижнемеловый тёмный флиш шипотской свиты; 2 – верхне-мелово-эоценовые пёстрые мергели венгловецкого типа; 3 – эоценовый флиш; 4 – менилитовая свита; 5 – верецкая (переходная) свита; 6 – нижнекросненская подсвита (толсторитмический песчаный флиш); 7 – среднекросненская подсвита (среднеритмический серый флиш); 8 – элементы залегания пластов пород (прямоугольниками показано нижнюю поверхность слоёв); 9 – тектонические брекчии, меланж хрупкого типа; 10 – тектонический меланж пластичного типа; 11 – зоны развития интенсивной мелкой складчатости; 12 – разломы главные, границы покровов; 13 – разломы второстепенные; 14 – геологические границы стратонов

На основании петрографического и минералогического изучения были выделены кальцитовые, кварц-кальцитовые и кварцевые минеральные типы жильных образований. Кальцитовые жилы более широко развиты по сравнению с кварц-кальцитовыми, хотя мелкие кристаллики кварца почти постоянно встречаются во всех типах жил и имеют все характеристики, которые присущи мармарошским «бриллиантам». Чаще всего мармарошские «бриллианты» находят в виде изолированных кристаллов, реже в виде их сростков и скоплений (рис. 3). Они часто «сидят» на вершинах ромбоэдрических и скаленоэдрических кристаллов кальцита или вместе с кальцитом входят в состав друз этого минерала, иногда в виде включений содержатся в самом кальците. Их размеры преи-

мущественно колеблются от 0,5 до 10,0 мм согласно главной кристаллографической оси. Они встречаются как единичные зёрна, а иногда как сростки.

Кальцит, который наполняет прожилки, представлен тремя генерациями. Для кальцита первой генерации характерна массивная текстура, молочно-белый цвет и зеркала скольжения. Кальцит второй генерации обычно имеет ромбоэдрический габитус, серый или смоляно-чёрный цвет. Кристаллы кальцита третьей генерации темноокрашенные, серовато-белого цвета. Для некоторых кристаллов кальцита характерна зональность от серого до чёрного цветов, они нарастают на кристаллах кварца.

Размер кристаллов кварца за главной кристаллографической осью обычно составляет от 3 до 15 мм, хотя встречаются отдельные кристаллы размером до 40 мм. В основном индивидуальности двухголовые, с развитыми в разной мере гранями гексагональной призмы и ромбоэдров, крепятся к субстрату гранями призмы.



Рис. 2. Фото выбуренных кернов



Рис. 3. Кристаллы кварца – мармарошских «бриллиантов» с включениями углеводородов. Рост кристаллов кварца происходил в водно-нефтяной среде

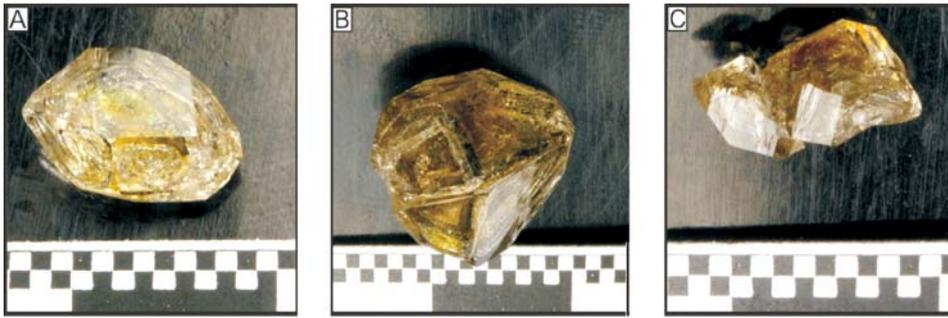


Рис. 4. Кристаллы кварца из пород Бескидского тоннеля:

А – кристалл кратко-призматического габитуса с равномерно развитыми гранями гексагональной призмы, позитивного и негативного ромбоэдров;
В – кристалл ромбоэдрического габитуса с относительно равномерным развитием граней ромбоэдров и мало развитыми гранями призмы и признаками рёберного скелетного роста;
С – сросток кристаллов кварца

Развитие этих граней приводит к габитусу кристаллов. Кристаллы имеют кратко-столбчатые, реже столбчатые очертания. Под габитусом выделяется два типа индивидов: гексагонально-призматический и ромбоэдрический. Первые из них делятся на два подтипа:

- *кратко-призматический* – характерный относительно равномерным развитием трёх главных форм: гексагональной призмы, позитивного и негативного ромбоэдров (рис. 4, А);
- *призматический* – главной формой которых есть гексагональная призма, ромбоэдры развиты преимущественно неравномерно и имеют второстепенное значение. Кристаллы ромбоэдрического габитуса имеют относительно равномерное развитие граней ромбоэдров и малоразвитые грани призмы (рис. 4, В). Кристаллы этого габитуса довольно распространены, а их размер согласно главной кристаллографической оси достигает 15 мм.

Кристаллы кварца прозрачные, жёлтого или бурого цвета, иногда бесцветные. Окраска обусловлена наличием большого количества однофазных и двухфазных включений редких и твёрдых углеводородов (рис. 5, А).

Включения в кварце исследовались методом флуоресценции (прибор «DiamondView™», разработка компании «ДеБирс») при излучении объектов УФ-волнами длиной 225 нм и мощностью УФ-лампы – 20 W. Для исследуемых флюидных включений характерен разный цвет флуоресценции, что зависит от их фазового состава и агрегатного состояния и, вероятно, компонентного состава углеводородов (рис. 5, В).

Однофазные прозрачные (вероятно метановые) или жидкостные желтоватые (вероятно нефтяные), а также двухфазные прозрачные (вероятно метановые, на рис. 5, А, L₁ и L₂ прозрачные) или желтоватые (вероятно метаново-нефтяные, на рис. 5, А, L₁ – прозрачная, а L₂ – желтоватая) включения характеризуются люми-

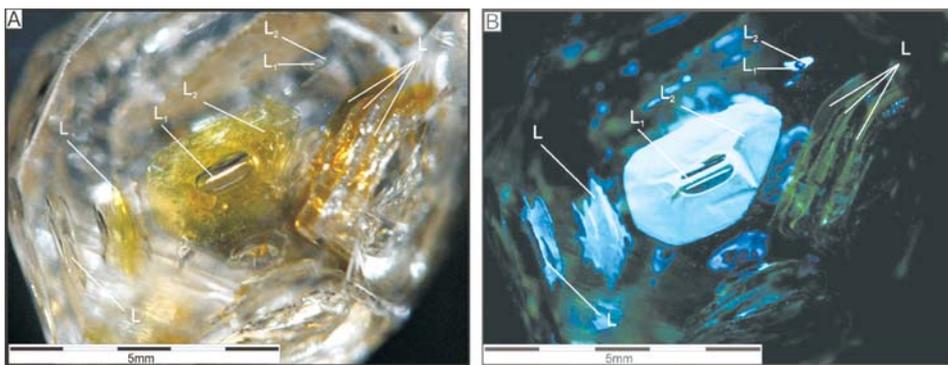


Рис. 5. Флуоресценция одно- и двухфазных включений разных углеводородов в кристаллах кварца

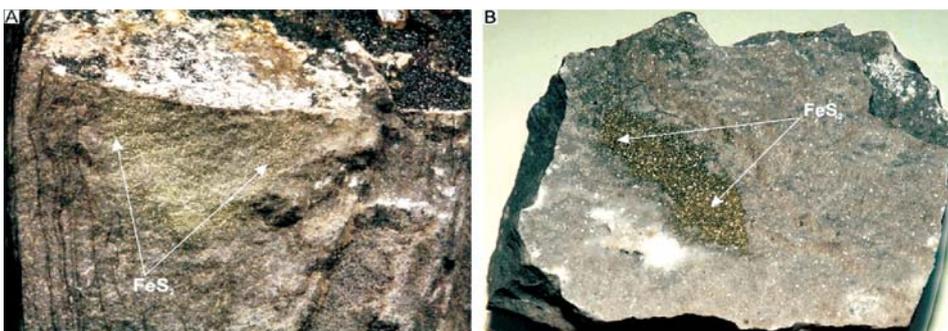


Рис. 6. Морфогенетические типы сульфидной минерализации в флишевых породах Кросненской зоны:

А – более ранние единичные выделения сульфидов во вмещающих породах;
В – сульфиды в составе сульфидно-кварц-карбонатных жил

несцентной голубовато-синей окраской. Однофазные (вероятно нефтяные) включения, заполненные наиболее плотным флюидом бурого или коричневого цвета, имеют люминесцентную зелёную окраску. Голубовато-синя окраска обусловлена наличием ароматических углеводородов в составе включений.

При макроскопических и петрографических исследованиях пород Кросненской зоны в пределах трассы нового Бескидского тоннеля выявлена сульфидная минерализация двух морфогенетических типов. Первый тип сульфидов сингенетический, установленный как более ранний и представлен одиночными выделениями и вкраплениями сульфидов и их скоплениями в вмещающих породах, часто в виде изометрических агрегатов (рис. 6, А), образование которых связано с этапом литификации собственно песчаников и аргиллитов. Второй тип сульфидов – это друзовые и жильные выделения, сформировавшиеся в условиях растяжения во время развития разрывных нарушений в уже литифицированных породах (рис. 6, В) с чётко выраженными кристалломорфологическими формами октаэдра и куба и их комбинациями, ассоциируется с кварцем и кальцитом, образующимися на стенках частично заполненных трещин, развивающимися обычно после кальцита и по его выделениям.

Широкий ареал распространения раннего пирита и локальные проявления позднего пирита и их тесное пространственное совместное нахождение указывают на привлечение материала вмещающих пород для формирования позднего пирита. Это подтверждается одинаковым химическим составом пиритов обоих морфогенетических типов и отсутствием в них привычных элементов-примесей.

Учитывая последовательность образования минералов в друзах и поздних жилах, можно сделать вывод, что их формирование происходило из растворов с достаточной концентрацией серы, фугитивность которой, однако, возросла только после кристаллизации кварца и кальцита, обеспечивая формирование позднего пирита.

Безусловно, поздний пирит имеет более обширное распространение в пределах Карпатской складчатой системы, чем считалось ранее,

однако, скорее всего он редко встречается из-за быстрого разрушения в экзогенных условиях, а уникальные находки неизменных сульфидов обоих типов объясняются условиями закрытой системы, которая существовала до проходки тоннеля.

Анализ геолого-геотехнических моделей классификации флишевого породного массива. Геолого-геотехническая модель № 1 на основании источника [2]. Поскольку породный массив на участке строительства тоннеля состоит из отложений флиша, предложен следующий метод: породные массивы, встречающиеся по трассе тоннеля, разделены на различные «секции» тоннеля, каждая из которых состоит из различных геотехнических пластов, а характеристиками их является комбинация свойств геотехнических пластов, включенных в эту «секцию» тоннеля.

Для каждой «секции» тоннеля свойства породного массива определялось согласно системам:

1. Q – системы (Бартон, 1974, 2002);
2. RMR (Rock Mass Rating) (Бенявский, 1973, 1989).

Каждая «секция» (элемент горной массы тоннеля RMTU) характеризуется конкретным процентным содержанием различных типов пород. Эти элементы с последовательной нумерацией отражают «секции» тоннеля с одинаковыми свойствами, а также геотехническую классификацию горных пород (табл. 1). Процентное распределение типов пород в пределах каждого RMTU сведено в таблицу 2.

В модели № 1 не представлены лабораторные данные о физических свойствах пород, но типичные значения предела прочности на одноосное сжатие (UCS) были оценены для каждой однородной секции по оси тоннеля. Эти значения UCS были также применены для Q и RMR классов горных пород (см. табл. 1) и в основном они больше 50 МПа, иногда между 20 МПа и 50 МПа. Исключением является одна короткая секция сланца, где ожидается значение UCS 1 МПа. Учитывая длину различных секций вдоль оси, общее среднее значение предела прочности на одноосное сжатие (UCS), взвешенное по длине, равно 53 МПа. Распределение значений UCS в модели № 1 показано на рис. 7.

Таблица 1

Модель №1. Геотехническая классификация RMTU

Модель 2007 г.				
Элемент горной массы тоннеля (RMTU)		UCS ненарушенной породы	Система-Q	RMR
№	Наименование RMTU	МПа	Класс-Q	Класс RMR
3	Сланец	19	Исключительно слабый	Очень слабый
4	Алевролит	75	Слабый	Слабый
5	Песчаник	75	Чрезвычайно слабый	Слабый
6	Глина-аргиллит-сланец	53	Очень слабый	Слабый
FO1	Складчатая зона	95	Слабый	Слабый
FA	Трещиноватая зона	41	Очень слабый	Очень слабый
7	Песчаник	55	Чрезвычайно слабый	Слабый
8	Глина-аргиллит	30	Очень слабый	Слабый
FO2	Складчатая зона	95	Слабый	Слабый
9	Глина-аргиллит	30	Очень слабый	Слабый
10	Песчаник	55	Исключительно слабый	Очень слабый
11	Сланец	1	Чрезвычайно слабый	Слабый
12	Песчаник	55	Исключительно слабый	Очень слабый
13TU	Глина-аргиллит-сланец-алевролит	57	Чрезвычайно слабый	Слабый

Таблица 2

Модель №1. Распределение типов литологии и горных пород для элементов горной массы тоннеля (RMTU)

Горные породы тоннеля (RMTU)	Распределение типов литологии и горных пород (%)							
	1	2	3	4	5	6	1, 2, 3, 4	5, 6
3	20	40			40		60	40
4				100			100	0
5	20				80		20	80
6	16	44			40		60	40
FO1	7	22,3			69,3		30,7	69,3
FA		72		28			100	0
7		20			80		20	80
8		100					100	0
FO2	7	23,3			69,3		30,7	69,3
9		100					100	0
10	10	65			25		75	25
11	100						100	0
12	10	65			25		75	25
13TU	15,4	52,3			32,3		67,7	32,3

Условные обозначения

1	Сланец (натуральный шифер)
2	Глинистый аргиллит
3	Осадочный аргиллит (не указан по оси тоннеля)
4	Алевролит
5	Песчаник/алевролит
6	Песчаник (не указан по оси тоннеля)

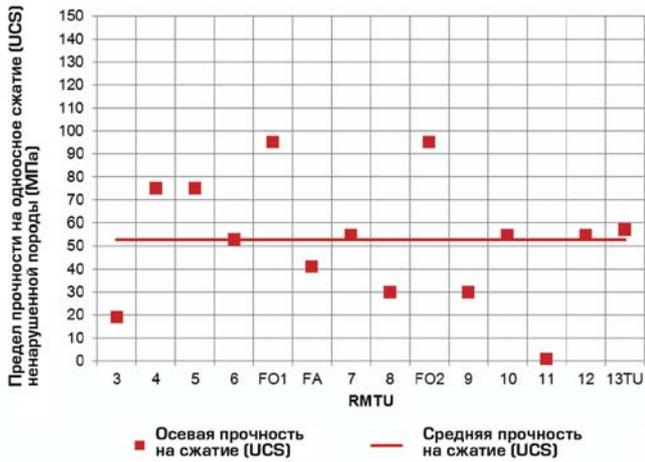


Рис. 7. Модель № 1.
Прочность ненарушенных пород для RMTU

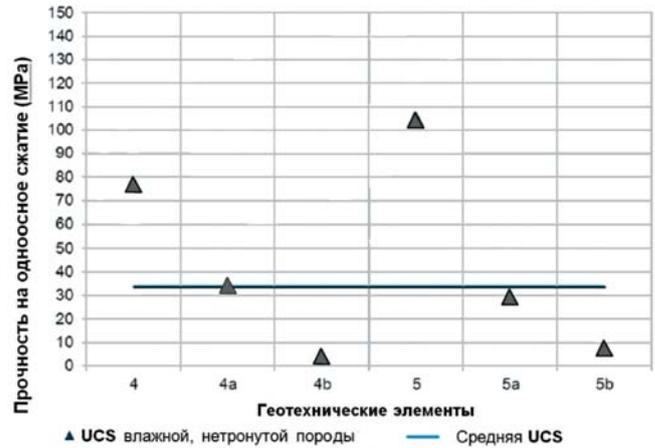


Рис. 8. Модель № 2. Прочность ненарушенных пород для геотехнических элементов (GTE)

Геолого-геотехническая модель № 2 на основании источника [3]. Здесь породный массив выделен на геотехнические элементы GTE (инженерно-геологические элементы ИГЭ), которые классифицированы по шкале проф. Протодяконова (по нормативной документации Украины) на основании коэффициента крепости f и его взаимосвязи с прочностью пород на одноосное сжатие (UCS, данные лабораторных испытаний). Геотехнические элементы определялись на основании преобладающего типа породы (песчаник или аргиллит), прочности ненарушенной породы и степени трещиноватости (табл. 3).

Результаты геофизических исследований и лабораторных испытаний пород геомассива представлены в таблице 4.

В модели № 2 оценка физико-механических свойств пород произведена на основе интерпре-

тации, сопоставления, взаимной увязки результатов бурения, геофизических и лабораторных работ с учётом материалов изысканий прошлых лет непосредственно на участке строительства тоннеля. Толща пород, слагающих рассматриваемую территорию, расчленена на 10 инженерно-геологических элементов (ИГЭ)/геотехнических элементов (GTE).

Модель представляет собой отобранные лабораторные данные по образцам горных пород и поверхностных грунтов. Лабораторные данные относительно горных пород включают содержание влаги, плотность и прочность на одноосное сжатие (UCS). Значения прочности на одноосное сжатие служат одним из параметров для определения геотехнических элементов GTE и основной вводной характеристикой для классификации горных пород по Протодяко-

Таблица 3

Модель № 2. Геотехническая классификация геотехнических элементов (GTE) (по Протодяконову)

Геотехнические элементы (GTE)		Классификация по Протодяконову
№	Характеристики	f
4	Толщи аргиллита и алевролита массивные, трещиноватые, плотные, с прослойками размягченного песчаника	Не ожидаются по оси тоннеля
4a	Толщи аргиллита и алевролита средней трещиноватости и прочности с прослойками размягченного песчаника	3
4b	Толщи аргиллита и алевролита, выветренные, сильной до средней трещиноватости, низкой прочности (сопротивляемости), с прослойками размягченного песчаника	1
5	Массивный песчаник, прочный, с прослойками неразмягченного аргиллита и алевролита	8
5a	Трещиноватый песчаник средней прочности с прослойками неразмягченного аргиллита и алевролита	4
5b	Сильно трещиноватый песчаник низкой прочности с прослойками неразмягченного аргиллита и алевролита	2
Разрушенный	Обломочный материал (обломочная брекчия)	1

Таблица 4

Модель № 2. Геотехнические параметры для геотехнических элементов (GTE)

Номер ИГЭ	Кoeff. крепости f по Протодьяконову	Плотность грунта, г/см ³	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, МПа	Прочность на сжатие, R_c		Кажущийся угол внутр. трения, град.	Модуль упругости, МПа		Модуль общей деформации E , МПа	Кoeff. удельн. упругого сопротивления	Кoeff. Пуассона
					Возд. сухое состояние	Водонасыщ. состояние		Динамический E дин.	Статический E стат.			
4	6	2,75	29	100	88,2	76,9	81	27498	15364	1500	150	0,37
4a	3	2,69	27	40	46,1	34,0	71	19921	10674	1300	96	0,36
4b	1	2,59	26	30	5,9	4,1	45	12858	6593	500	39	0,29
5	8	2,72	33	100	124,4	104,4	83	18731	9903	1700	200	0,39
5a	4	2,67	31	50	53,4	29,2	76	17840	9402	1200	88	0,37
5b	2	2,58	29	40	9,0	7,7	63	11083	5486	600	44	0,36

нову. Статистическая оценка данных по UCS показывает, что средние значения UCS (отдельно для сухих и мокрых образцов) были, в основном, выбраны в качестве геотехнических параметров для каждого геотехнического элемента (см. табл. 4).

Типичные значения прочности на одноосное сжатие для всех геотехнических элементов GTE показаны на рис. 8. Среднее значение UCS по длине тоннеля составляет 34 МПа.

Анализ-сравнение геолого-геотехнических моделей № 1 и № 2. Модели описывают типы пород стратиграфического слоя P_3kr_1 (с несколько отличающейся терминологией), включающего песчаники и алевролиты, аргиллиты, алевроаргиллиты и только сланцы, и только аргиллиты соответственно. Различия в терминологии несущественны для геотехнического сравнения.

В этих моделях применены разные подходы. Эти различия особенно существенны по отношению к общей классификации горной массы и прогнозированию классов горных пород по трассе тоннеля, что ограничивает прямое сравнение соответствующих геотехнических элементов. В обеих моделях определены однородные секции по оси тоннеля, для которых характерны специфические свойства литологии и горных пород. Подходы к их определению значительно различаются.

В модели № 1 однородную секцию по оси тоннеля называют «элементом горной массы тоннеля» (RMTU). Эти элементы последовательно пронумерованы. Каждый элемент RMTU состоит из определенного процентного спектра типов пород (см. табл. 2), но включает только один класс горной породы (Q и RMR, см. табл. 1).

Это означает, что в секциях значительной длины вдоль оси тоннеля геотехнические условия практически остаются постоянными.

В модели № 2 однородная секция включает один или два разных «геотехнических элемента» (GTE), распределение которых не указано. Исключением является прочность ненарушенных пород на одноосное сжатие (UCS), что является одной из основных вводных данных для классов Q и RMR согласно классификации горных пород в модели № 1. Она также является основой нормативной клас-

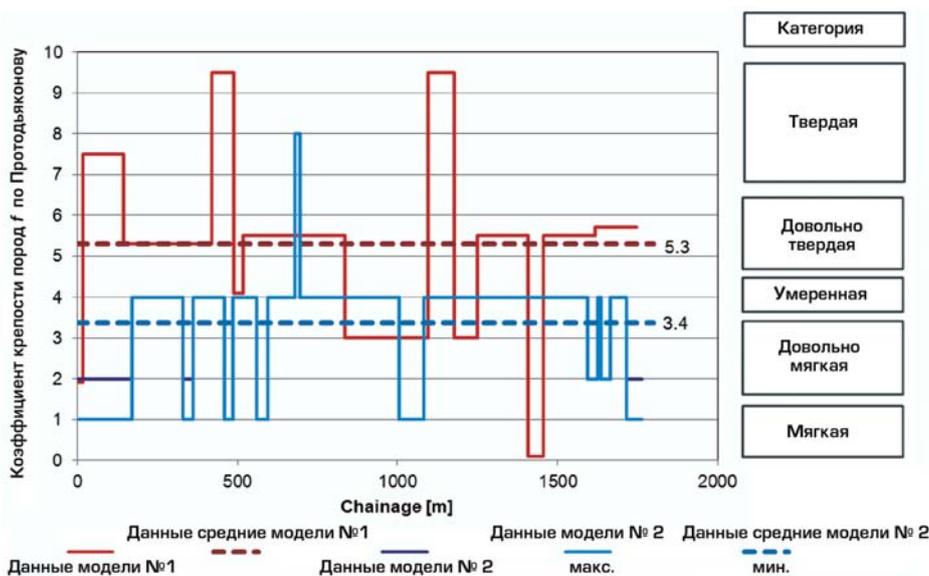


Рис. 9. Сравнительная таблица данных в моделях № 1 и № 2

сификации Украины по Протодяконову. Значения прочности на одноосное сжатие имеются для обеих моделей. В модели №1 типовые значения UCS определены для каждого RMTU (осевой секции и элемента горной массы), в модели № 2 значения UCS были определены лабораторным тестированием образцов кернов.

Сравнение данных прочности на одноосное сжатие в обеих моделях показывает, что значения UCS модели № 2, в основном, ниже чем в тендерной модели № 1. Средневзвешенный показатель UCS 34МПа для модели № 2 на 36 % ниже среднего значения 53 МПа в модели № 1.

Натурные исследования флишевого породного массива в условиях строительства Бескидского тоннеля. Согласно геолого-геотехнической модели № 2, крепость породы по шкале Протодяконова колеблется от 2 до 8 (см. табл. 3). Причина значительного разброса в значениях коэффициента крепости пород, определенного стандартизованным методом (ГОСТ 21153.1-75), подробно рассмотрена в статье [4]. На основании геологоразведки (опережающего разведочного кернового бурения), инженерно-геологического обеспечения проходческих работ в конкретных условиях проходки Бескидского тоннеля и анализа полученных результатов предлагаем методологию классификации породного массива, приведенную в таблице 5.

Таблица 5

Метод классификации породного массива переслаивающих геотехнических пластов

№ метода	Описание
1	Если два или более геотехнических пласта, имеющих сопоставимые геотехнические свойства, переслаиваются, то для классификации использовать средневзвешенное значение (отношение массы к объему)
2	Если различие свойств геотехнических пластов слишком большое для усреднения, тогда усреднение массы не допускается. В этом случае используется один из следующих двух методов: а – если слои слабого переслаивающего геотехнического пласта относительно тонкие (до 0,3 м) между более прочными пластами, тогда более слабый пласт рассматривается как материал (заполнитель), в более прочном породном массиве; б – если слои переслаивающего слабого геотехнического пласта относительно толстые (более 0,3 м), то свойство пласта принимается равным свойствам более слабого пласта

Таким образом, трасса тоннеля была разделена на «секции» и выполнена их классификация согласно описанной методологии. Геотехнические пласты «секций» были исследованы



Рис. 10. Стройплощадка Восточного портала

лабораторным путём и определены: деформационные и прочностные характеристики наиболее прочного и наиболее слабого пластов [1].

Все полученные параметры сведены в таблицу 6.

Определение деформационных и прочностных характеристик флишевого геомассива с учётом трещиноватости, анизотропности и неоднородности скальной среды. На основе проведенных натурных исследований флишевого геомассива с использованием системы Q появилась возможность численно определить модуль деформации анизотропного геомассива E_m эмпирическим методом и провести сравнение полученных данных с модулем деформации породного образца E_0 пластов «секций». Подобный анализ необходим для выполнения дальнейших исследований с вводом полученных значений в соответствующую расчётную модель скального геомассива (модель трещиноватых пород -Jointed Rock Mass model).

Для определения E_m при значениях $Q < 1$ необходимо выполнить перевод с Q-системы оценки скального массива (Barton et al., 1974) в систему оценки Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1973) через следующую корреляционную зависимость [5]:

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 .$$

В работе (Serafim, Pereira, 1983) предлагается выражение для определения E_m на базе системы RMR, а именно [5]:

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} , \text{ ГПа.}$$

Для выполнения дальнейших расчётных исследований методом конечных элементов под конкретную модель геомассива необходимо определить (для каждого геотехнического пласта «секций»): модуль деформации в направле-

Таблица 6

№ секции	Метод классификации	Q (Barton et al., 1974)	RMR (Bieniawski, 1973)	E_M , ГПа	E_{II} , ГПа	E_{\perp} , ГПа	
I	№ 1	0,007	18	1,6	1,1	0,6	
II	№ 1	0,002	11	1,0	0,7	0,4	
III	№ 2a	прочный пласт	0,11	36	4,7	4,0	2,3
		слабый пласт (заполнитель)	0,002	11	1,0	0,7	0,4
IV	№ 2b	0,034	28	2,8	2,3	1,3	

нии, параллельном напластованию флишевых слоёв E_{II} и в перпендикулярном напластованию флишевых слоёв E_{\perp} .

Определение данных значений модулей деформации широко описано в работе [6]. Многочисленные исследования позволили сформулировать следующие зависимости:

$$E_{\perp} = 0,4 \cdot E_M; \quad E_{II} = 0,7 \cdot E_M.$$

Полученные эмпирические значения E_{\perp} и E_{II} для каждого геотехнического пласта «секции» сравнивались с лабораторными значениями [1]. По итогам данного анализа принималось решение об окончательном значении этих параметров по следующему принципу: если эмпирические значения E_{\perp} и E_{II} оказывались **больше** чем значения модуля деформации породного образца E_0 , то как окончательное расчётное значение модуля деформации пластов «секций» принимались значения E_{\perp} и E_{II} ; а если **меньше**, то как окончательное расчётное значение модуля деформации пластов «секций» принималось значение E_0 .

По данному принципу были определены все основные деформационные характеристики флишевого геомассива под усовершенствованную расчётную модель анизотропной среды (модель трещиноватых пород - Jointed Rock Mass model, [7]). Значения характеристик приведены в таблице 6.

Выводы. Проведены исследования двух геолого-геотехнических моделей классифика-

ции флишевого породного массива участка строительства Бескидского тоннеля.

На основании анализа моделей и натурных исследований, выполненных непосредственно во время проходки тоннеля, установлено:

- Классификация горных пород по шкале проф. М.М. Протодяконова несовершенна для условий анизотропного геомассива (породы флишевой толщи).
- Породный массив на участке строительства Бескидского тоннеля состоит из отложений флиша, характеризующегося частой сменой слоёв песчаника, алевролита, глинистого аргиллита и сланцевой глины, что не даёт возможности подробно детализировать расположение различных геотехнических пластов, которые встречаются на всем протяжении тоннеля. Для описания породного массива предложена методология классификации переслаивающихся геотехнических пластов.
- Для выполнения численного моделирования с использованием программ, основанных на МКЭ, предложена методика определения физико-механических характеристик флишевого породного массива под определенную геотехническую модель (модель трещиноватых пород - Jointed Rock Mass model, [7]), которая наиболее полно описывает поведение анизотропной среды.

[1] Геологічна будова Бескидського залізничного тунелю. Пояснювальна записка. Том I. Будівельна Асоціація «Інтербудмон-таж». Приватне Акціонерне Товариство «Інтербудтоннель», 2017 р.

[2] Инженерно-геологические исследования зоны Бескидского тоннеля («Witteveen+Boss» и ИТС – Международный институт Геоинформатики и изучения Земли, 2007 г.).

[3] Научно-технический отчёт о результатах комплексных инженерных изысканий (Киевский институт инженерных изысканий и исследований «Энергопроект», 2012 г.).

[4] *Стовпник С.Н., Осипов А.С.* Обоснование нового подхода в проектировании временной крепи для условий флишевого сложения геомассива при строительстве Бескидского тоннеля –

Гірничий вісник – Криворізький національний університет, 2017 – Випуск №102, – С. 67–73.

[5] *Зерцалов М.Г.* «Механика грунтов» (введение в механику скальных грунтов). – Издательство Ассоциации строительных вузов – М.:, 2006 г.

[6] *Баклашев И.В.* «Геомеханика» Том 1. Основы геомеханики – М.:, Издательство Московского Государственного Горного Университета, Высшее Горное образование, 2004 г.

[7] *Plaxis 2D/3D.* Руководство пользователя. Часть 3. Пособие по моделям материалов, «НИП-Информатика». – Санкт-Петербург, 2012 г.