

УДК 624.191.22

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ «МАССИВ–ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА–КРЕПЬ» («М-ТС-К») ДЛЯ УСЛОВИЙ ФЛИШЕВОГО СЛОЖЕНИЯ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕСКИДСКОГО ТОННЕЛЯ

В статье описываются исследования механики подземных сооружений и геомеханики на объекте Бескидского тоннеля в Карпатах. Подводятся итог всей проделанной научной работы, выполненной при проектировании и строительстве тоннеля. На протяжении четырех лет с начала проходки тоннеля объектом исследования был флишевый породный массив зоны строительства, а также взаимодействие этого массива с конструкцией новых и существующих инженерных сооружений (с крепью выработок) с учетом всех технологических этапов строительства. В статье представлены основные моменты методологии расчета системы «М-ТС-К».

The article describes the research of the mechanics of underground structures and geomechanics on the Beskid Tunnel object in the Carpathians. The result of all the scientific work done during the design and construction of the tunnel is summarized. For four years from the beginning of tunnel penetration, the object of investigation was the flysch rock massif of the construction zone, as well as the interaction of this massif with the construction of new and existing engineering structures taking into account all the technological stages of construction. The article presents the main points of the methodology for calculating the «M-TC-K» system.

Ключевые слова: Бескидский тоннель, технология строительства, геология Карпат, флишевая толща, анизотропный геомассив, напряженно-деформированное состояние (НДС) обделки тоннеля и геомассива, математическое моделирование, Plaxis 3D.

Обоснование методологии расчета. В статье предложена методология расчета конструкции крепи горных тоннелей на основе единой системы «массив–технология строительства–крепь» и моделирование с учетом временного фактора (последовательность строительства выработки, раскрытия сечения выработки и т.д.).

Условия строительства подземных выработок характеризуются множеством взаимосвязанных природных и техногенных факторов. При проектировании и строительстве вмещающий массив, технология строительства и крепь должны рассматриваться как элементы природно-технической геосистемы.

Натурные исследования свидетельствуют о существенном влиянии технологии строительства (последовательность проходки, очередность раскрытия сечения, продвижение забоя и т.д.) на величину и характер распределения усилий в крепи подземных выработок.

Существующие методы расчета крепи выработок согласно нормативной документации, как правило, основаны на схеме заданных нагрузок, не учитывают основные этапы технологии строительства, а также другие условия и факторы, оказывающие значительное влияние на развитие геомеханических процессов и напряженного состояния и, в связи с этим, не в полной мере отражают особенности их работы.



А.С. Осипов

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

Расчет сложных конструкций крепи в виде стержневой системы на основе строительной механики требует использования значительных допущений, что является серьезной проблемой, особенно при разработке принципиально новых конструкций и технологических решений ввиду невозможности достоверной оценки величины влияния вносимых изменений в существующую расчетную схему. Для разработки расчетной схемы при таком подходе проектирование выполняется с большим запасом прочности.

Пример расчета обделки Бескидского тоннеля на заданные нагрузки, определенные согласно действующим нормативным документам [9], приведен на рис. 1.

Применяемые в настоящее время подходы к расчету и проектированию крепи подземных выработок не позволяют получить полную картину формирования ее напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе строительства и эксплуатации.

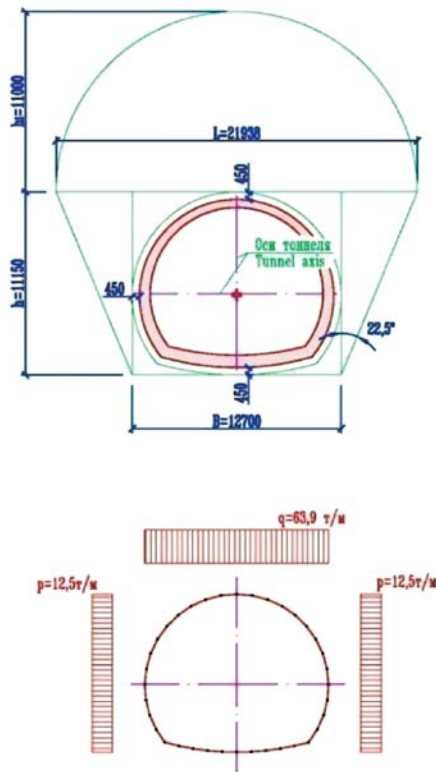


Рис. 1. Расчет обделки Бескидского тоннеля на заданные нагрузки по СНиП II-44-78. Сбор нагрузок

Современная стратегия развития подземного строительства ориентирует на решение крупных научных и технических проблем:

- геомеханическое обоснование проектирования и строительства;
- разработка и внедрение методов подготовки и способов воздействия на геомассив с целью изменения их физико-механических свойств;
- совершенствование и внедрение передовых методов строительства (высокие технологии);
- обоснование и разработка технических и технологических решений гибких управляемых технологических процессов;
- концепции мониторинга строительства и эксплуатации подземных сооружений на основе исследования процессов, предшествующих моменту перехода в аварийное состояние;

- методы выявления и оценки рисков, остаточных ресурсов и долговечности подземных объектов.

Важнейшими направлениями стратегии развития подземного строительства являются исследования: геомеханических процессов в системе «массив–технология строительства–крепь» («М-ТС-К»); свойств вмещающего массива; оценки устойчивости выработок; выбора рациональных конструкций крепи; методологии мониторинга для контроля состояния крепи на всех этапах его строительства и эксплуатации.

Исходя из современных позиций геомеханики и геотехнологии массив, технология строительства и крепь подземной выработки должны рассматриваться как *подсистемы единой геосистемы* (рис. 2). Система «массив–технология строительства–крепь» отображает взаимодействие факторов и их сочетаний, влияющих на эффективность строительства и эксплуатацию подземной выработки.

Решение сложных инженерных задач возможно в программном комплексе, основанном на методе конечного элемента (МКЭ), отвечающем современным требованиям моделирования на основе единой системы «М-ТС-К».

Решение той или иной задачи с использованием МКЭ является по сути машинным экспериментом. Как и эксперимент, это решение, в отличие от аналитического, не обладает общностью и справедливо (при соответствующей точности) лишь для конкретной данной конструкции и данного конкретного массива. Поэтому МКЭ применяется обычно для расчета сложных и ответственных конструкций с детальным учетом конкретных условий работы. Для получения высокой точности метод требует больших затрат труда, современного компьютерного расчетного комплекса и высокого класса ЭВМ.

С помощью МКЭ можно рассматривать сложную реальную геометрию, изотропные и анизотропные материалы с линейными, нелинейными и вязкими свойствами, смешанные

ГЕОСИСТЕМА «М-ТС-К»

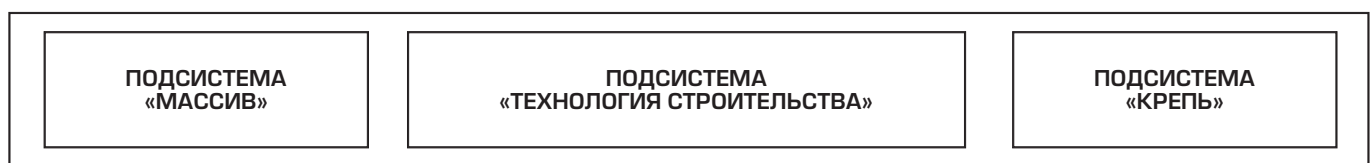


Рис. 2. Наглядное представление работы геосистемы «М-ТС-К»

граничные условия и технологическую последовательность выполнения операций при строительных процессах.

Расчетно-теоретические исследования НДС геосистемы «М-ТС-К». Рассмотрим пример численного моделирования закономерности влияния приближения забоя горной выработки (эвакуационной сбойки) к эксплуатируемому тоннелю на напряженно-деформированное состояние геосистемы «М-ТС-К» в условиях флишевого сложения пород. Это позволило установить и назначить технические решения, обеспечивающие надежность и безопасность эксплуатации тоннеля.

Таким образом, объектом исследования в данной статье являются:

- действующий (эксплуатируемый) однопутный железнодорожный тоннель, построенный в 1886 году. За результатами анализа обследования технического состояния он признан аварийным;
- новый построенный двухпутный железнодорожный тоннель;
- эвакуационная сбойка между этими тоннелями (3 шт.).

Структура геомассива состоит из флишевой толщи, т.е. с постоянно меняющимися (каждые 2–20 м) напластованиями песчаников и аргиллитов с непредсказуемыми углами падения и формами залегания (антиклинальная или синклинальная складчатая дислокация). Моноклиналная форма залегания отсутствует. Также геомассив характеризовался неупорядоченной (хаотичной) трещиноватостью и явной анизотропностью.

На основании комплексного анализа и обработки материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных в процессе кернового бурения горизонтальных опережающих скважин в лоб забоя при проходке нового Бескидского тоннеля, была разработана новая классификация флишевого породного массива и создана натурная геологическая модель № 3 [1]. Трасса тоннеля от Восточного до Западного портала была геометрически разделена на «секции», каждая из которых состоит из различных геотехнических пластов (рис. 3, 4). Выполнена классификация этих «секций» [1]. Для каждой «секции» тоннеля согласно «выходу керна» и его свойств были получены необходимые параметры, а именно:

- индекс качества выработки по Q-системе (Q-рейтинг горных пород), разработанный норвежским геотехническим институтом (Barton et al., 1974);
- индекс качества выработки по RMR-системе (Rock Mass Rating горных пород) (Bieniawski, 1973);
- геологический индекс прочности GSI (Hoek, 1999);
- эмпирический параметр ненарушенной породы m_i , который определяет степень взаимного зацепления минеральных частиц;
- модуль деформации *породного образца* пластов «секции» E_o (лабораторным путем);
- модуль деформации *анизотропного геомассива* E_m (эмпирическим путем);
- модуль деформации в направлении, параллельном и перпендикулярном напластованию флишевых слоев $E_{||}$ и E_{\perp} (эмпирическим путем);
- предел прочности на одноосное сжатие *породного образца* пластов «секции» σ_{ci} (лабораторным путем);
- предел прочности на одноосное сжатие и растяжение *анизотропного геомассива* σ_c и σ_p (эмпирическим путем).

Деформационные и прочностные характеристики флишевого породного массива определялись под геотехническую модель трещиноватых пород – Jointed Rock Mass model [2], которая наиболее полно отвечает поведению трещиноватой, анизотропной и неоднородной среды [1].

Обобщенная инженерно-геологическая исполнительная схема разделения на «секции» трассы Бескидского тоннеля и сводная таблица деформационных и прочностных характеристик геомассива представлены на рис. 4 и в таблице 1.

До начала выполнения математического моделирования была выполнена геомеханическая оценка технического состояния эксплуатируемого тоннеля, по результатам которой были определены:

1. Предел прочности на сжатие обделки тоннеля из природного камня (песчаник) – $R_c^{нк} = 52$ МПа.
2. Предел прочности на сжатие кладочного раствора тоннеля – $R_c^{кп} = 19$ МПа.

Испытания проводились неразрушающим методом контроля прибором ОНИКС-2,5 по ДСТУ Б В.2.7-220:2009.

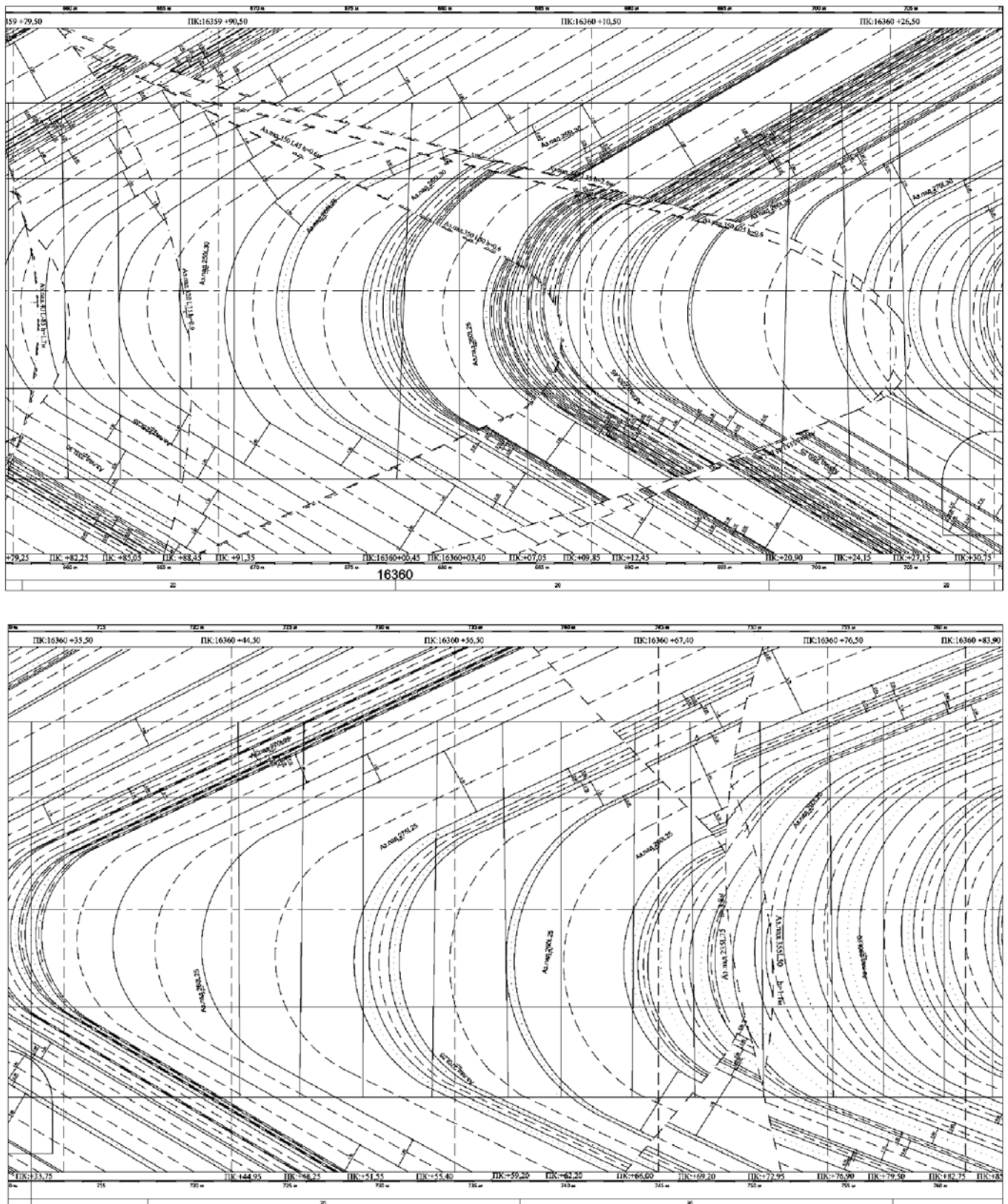


Рис. 3. Участок геологического строения в районе сбойки № 2 (ПК16360+32,1). Геологические пласты «секции»

3. «Пороговые» или граничные значения деформаций обделки действующего тоннеля, при

превышении которых в конструкции возникают растягивающие напряжения, составляют 20 мм.

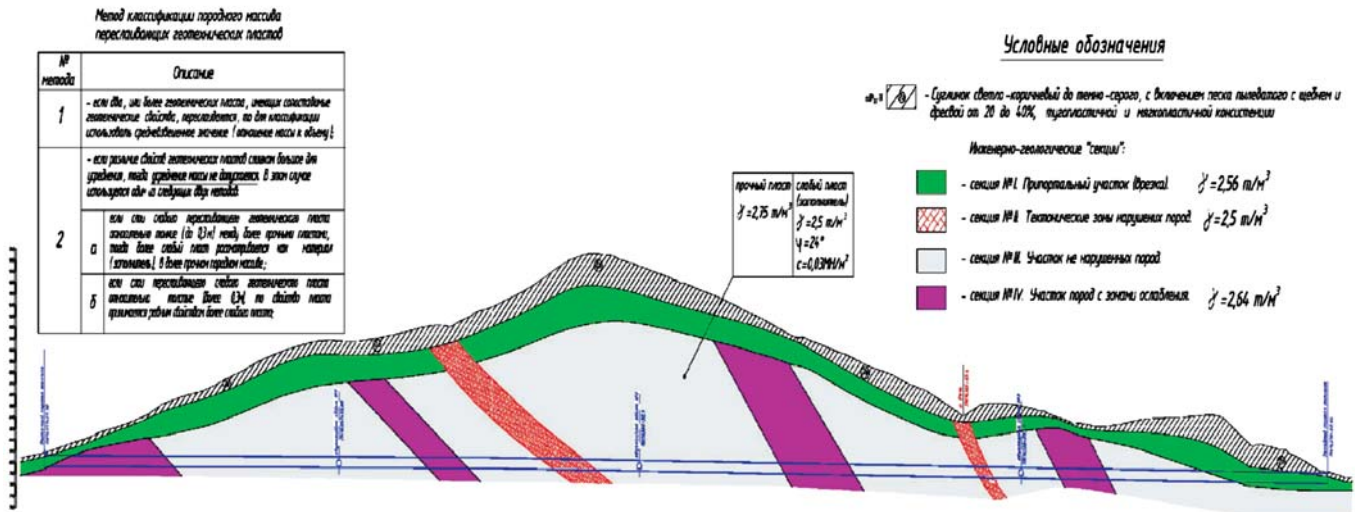


Рис. 4. Обобщенная инженерно-геологическая схема разделения на «секции» трассы Бескидского тоннеля, составленная по результатам обработки данных, полученных при геологоразведочном керновом бурении горизонтальных опережающих скважин

Таблица 1

Сводная таблица деформационных и прочностных характеристик флишевого геомассива, определенных для модели трещиноватых анизотропных пород – Jointed Rock Mass model (Plaxis, Midas GTS)

№ секции	Метод классификации	Q (Barton et al., 1974)	RMR (Bieniawski, 1973)	GSI (Hoek, 1999)	m_i	E_0 , ГПа	E_M , ГПа	E_{II} , ГПа	E_I , ГПа	D	σ_{ci} , ГПа	σ_c , ГПа	σ_d , ГПа	
I	№ 1	0,007	18	30	4	0,8	1,6	1,1	0,6	0,1	70	1,1	0,1	
II	№ 1	0,002	11	20	4	0,2	1,0	0,7	0,4		60	0,5	0,03	
III	№ 2а	прочный пласт	0,11	36	60	19	3,1	4,7	4,0		2,3	150	15,0	—
		слабый пласт (заполнитель)	—	—		—	—	—	—		—	—	—	—
IV	№ 2б	0,34	28	50	12	1,9	2,8	2,3	1,3	120	7,1	0,22		

Таблица 2

№ сбоек	1	2	3
Пикет сбоек	ПК16357 + 33,68	ПК16360 + 32,1	ПК 16366 + 29,45
Глубина заложения тоннеля от поверхности земли, м	100	160	60
Вертикальная нагрузка на верхнюю границу расчетной области от веса вышележащего геомассива, P, кПа	1600	3200	400

Математическое моделирование было выполнено в геотехническом программном комплексе Plaxis 3D 2016 для 3-х сбоек, расположенных на разных глубинах в секции № III (см. рис. 4). Принципиально новым моментом моделирования поставленной задачи был учет в 3D-постановке фактора времени (подсистемы TC), а именно: учет продвижения забоя сбоек к действующему тоннелю на длину каждой заходки, равной 1 м, и учет нарастания прочности

набрызгбетона крепи во времени при продвижении забоя сбоек.

Пикеты сбоек, их глубина и вертикальная нагрузка на расчетную область приведены в таблице 2.

Чтобы учесть технологический процесс отставания крепи от обнажения пород при продвижении забоя сбоек, в расчете применялась известная методика определения коэффициента начальной разгрузки геомассива α^* [3, 4, 5].

Коэффициент α^* определяется по следующим эмпирическим формулам:

$$\alpha^* = \exp\left(-1,3 \frac{l_0}{r_0}\right), \quad (1)$$

где r_0 – радиус (или полупролет) сечения выработки в проходке, м; l_0 – отставание установки крепи от забоя выработки, м;

$$\alpha^* = 0,988 E_M^{-0,053} \cdot \exp[L(0,059 - 0,033 \ln E_M)], \quad (2)$$

где E_M – модуль деформации породы призабойной зоны, МПа; L – длина строительной заходки, м.

Итак, при длине строительной заходки (отставания установки крепи от забоя выработки), равной 1 м, $\alpha^* = 0,6$.

Данный коэффициент определяет начальные смещения (деформации) пород призабойной зоны, которые возникают до возведения крепи сбойки (до ввода в работу крепи в контакт с геомассивом), а также степень падения бытовых напряжений в геомассиве на длине призабойной неподкрепленной зоны выработки, равной $l_0 = 1,0$ м, а именно: 40 % от начального напряжения в геомассиве действует на неподкрепленный контур выработки ($0,4\sigma_{x,y}^0$) и 60 % воспринимает крепь выработки ($0,6\sigma_{x,y}^0$).

Более подробно учет данного метода в условиях флишевого сложения пород описан в [6, 7].

Материал обделки горных выработок моделировался объемными элементами с использованием упругопластической модели (модель пластического течения с критерием прочности

по Мору-Кулону). Параметры прочности сцепления c и угла внутреннего трения φ для модели МК определялись из диаграммы наибольших кругов напряжений Мора (паспорта прочности) или по формулам:

$$R_c = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (3)$$

$$R_p = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (4)$$

где R_c и R_p – для действующего тоннеля принимались по результатам геомеханической оценки его технического состояния, а для новых выработок (строящегося тоннеля и сбоек) – по характеристикам применяемого набрызгбетона (для временной крепи), определяемого в строительной лаборатории ПрАТ «Интербудтоннель» (подрядчика).

Согласно протоколу испытаний на $t = 28$ сут предел прочности набрызгбетона составляет:

$$R_c^{28B} = 38,0 \text{ МПа}, \quad R_p^{28B} = 2,3 \text{ МПа}.$$

По эмпирической формуле (5) определяется прочность бетона на любые, необходимые для расчета, сутки [5]

$$R_{ct} = 0,69 \cdot R_c^{28B} \cdot \lg t, \quad (5)$$

где t – возраст бетона, сут.

Основные уравнения, описывающие упругопластическую модель Мора-Кулона, приведены в источнике [2].

Основные результаты расчета на сбойку № 3 представлены ниже.

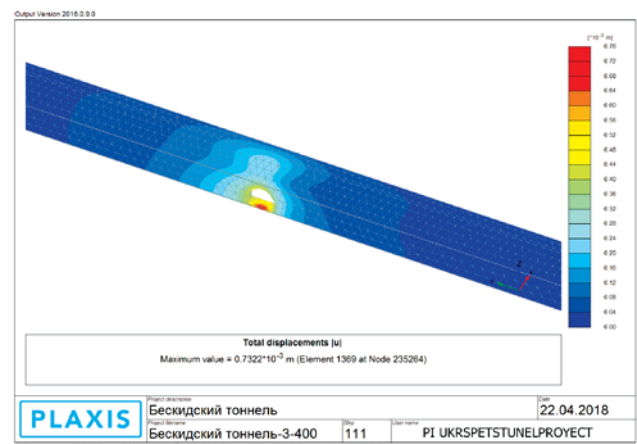
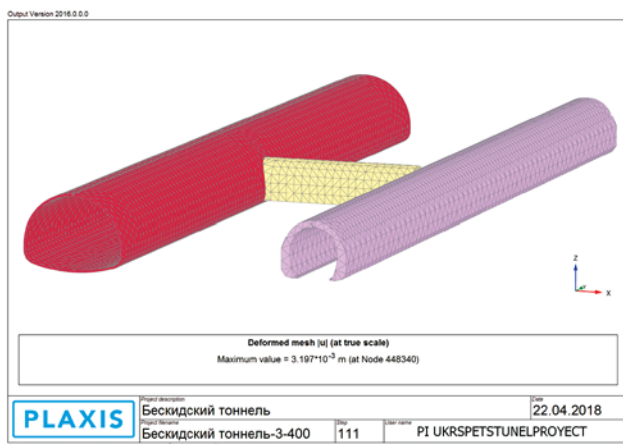


Рис. 5. Общий вид расчетной модели и общие деформации в конструкции действующего тоннеля на последней фазе расчета (геомассив условно не показан)



Рис. 6. Общие деформации в геосистеме при длине тупиковой выработки (сбойки), равной 1 м

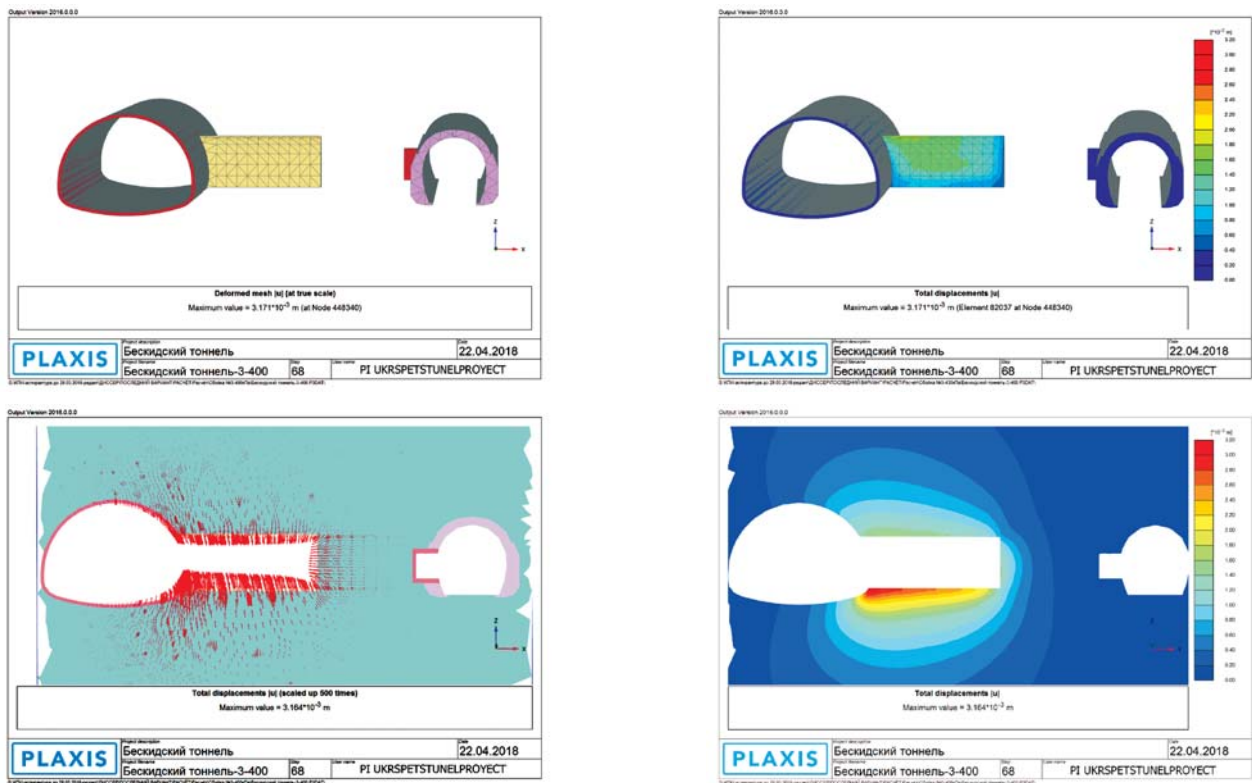


Рис. 7. Общие деформации в геосистеме при длине тупиковой выработки (сбойки), равной 11 м

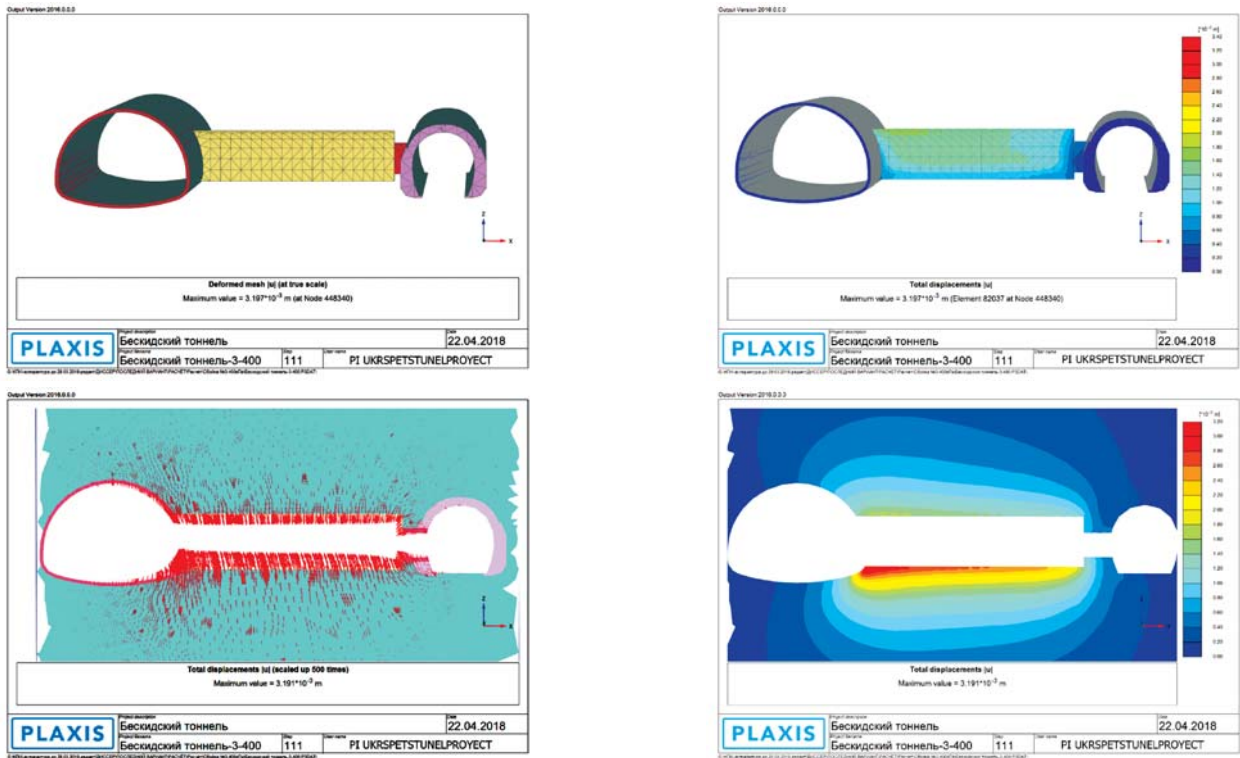


Рис. 8. Общие деформации в геосистеме при сопряжении сбойки с камерой действующего туннеля

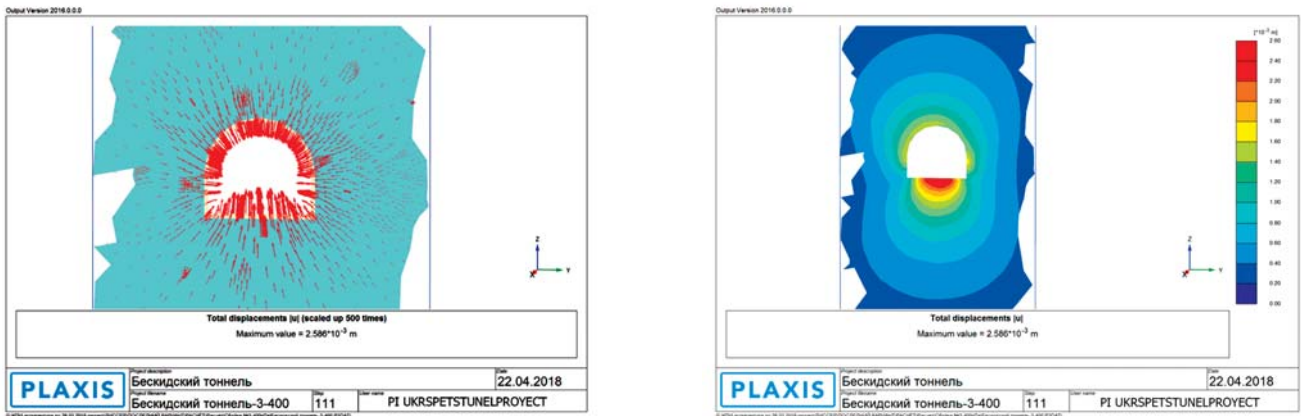


Рис. 9. Общие деформации в геосистеме при сопряжении сбойки с камерой действующего туннеля (разрез по сечению сбойки на 8-м м)

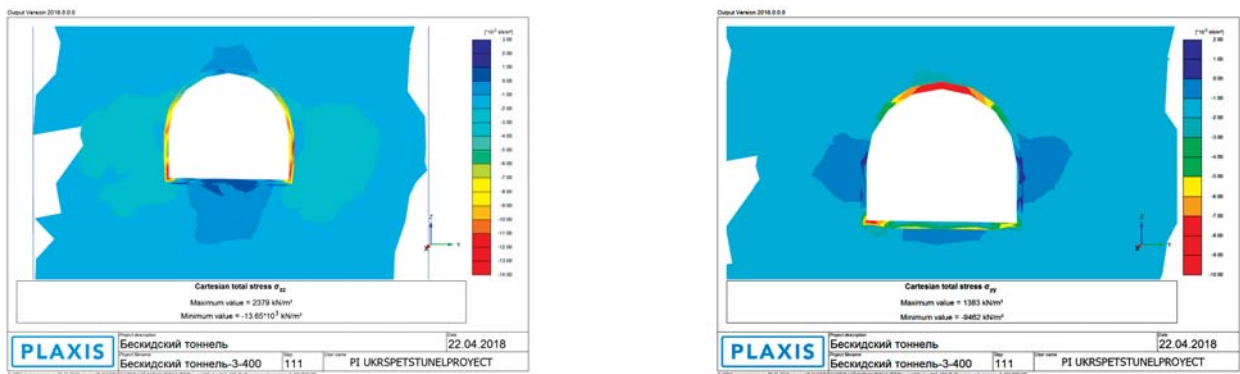


Рис. 10. Вертикальные и горизонтальные напряжения в геосистеме при сопряжении сбойки с камерой действующего туннеля (разрез по сечению сбойки на 8-м м)

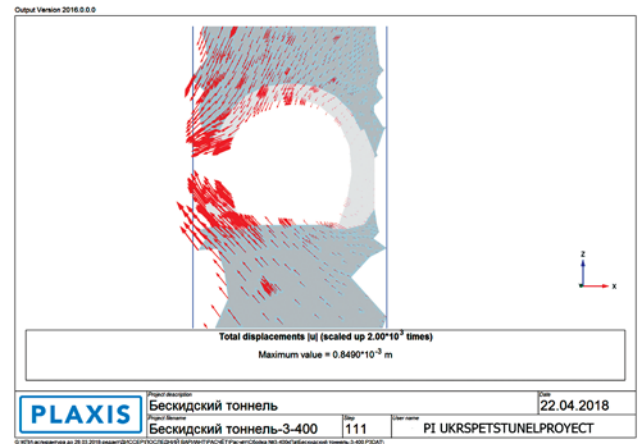
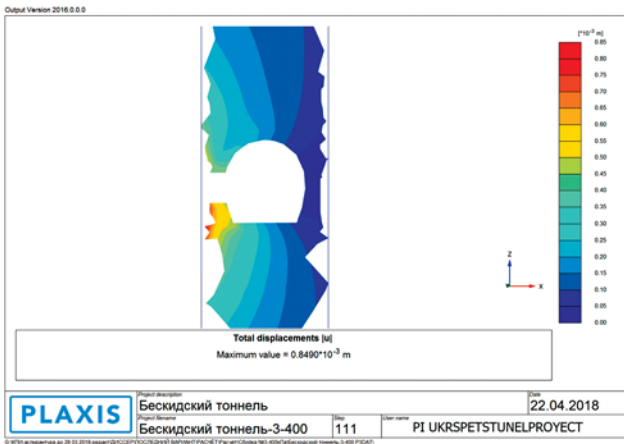


Рис. 11. Общие деформации в геосистеме при сопряжении сбойки с камерой действующего тоннеля (разрез по действующему тоннелю)

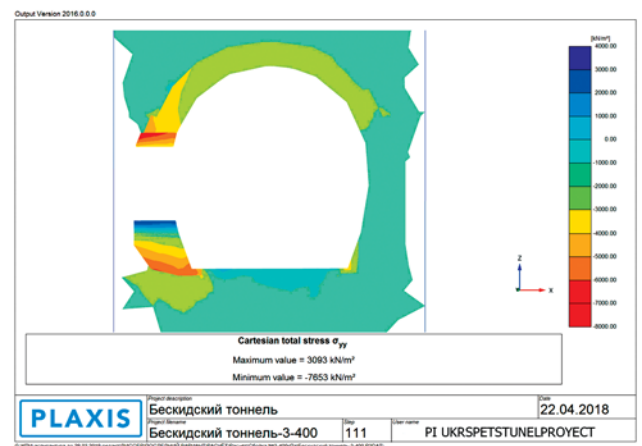
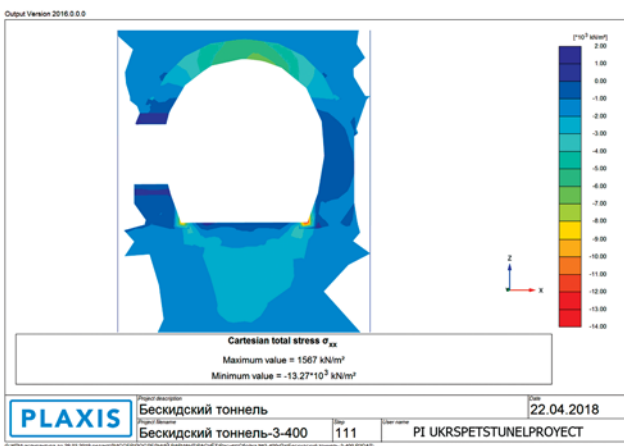
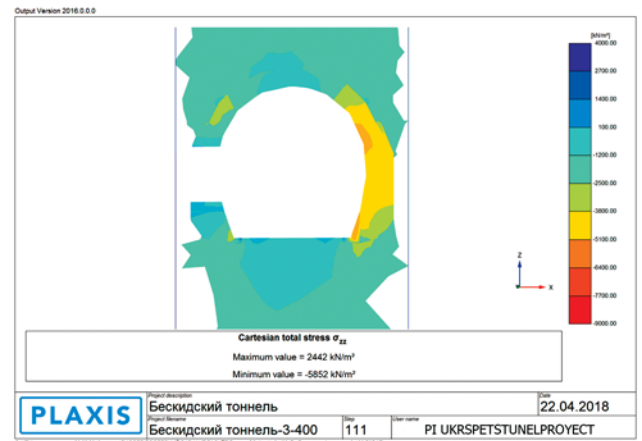
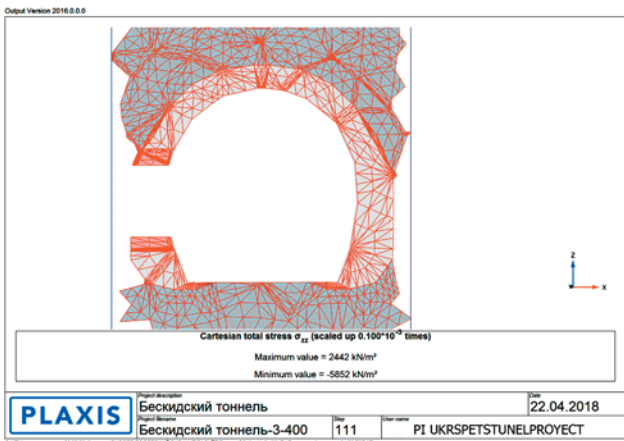


Рис. 12. Вертикальные, горизонтальные и продольные напряжения в геосистеме при сопряжении сбойки с камерой действующего тоннеля (разрез по действующему тоннелю)

Анализ результатов расчетно-теоретических исследований показал следующее:

- в геосистеме «М-ТС-К» наибольшее влияние на формирование НДС обделки эксплуатируемого тоннеля оказывает технология строительства сбоек (подсистема ТС);
- на всех этапах проходки при приближении забоя сбойки к действующему тоннелю материал обделки тоннеля находится в состоянии всестороннего сжатия;
- максимальные сжимающие напряжения в обделке не превышают прочности кладки на сжатие;
- общие деформации обделки эксплуатируемого тоннеля не превышают «пороговых» (граничных) значений, определенных в ходе обследований его технического состояния.

Полученные результаты деформаций обделки эксплуатируемого тоннеля в дальнейшем были подтверждены натурными исследованиями, выполненными в процессе проходки сбоек [8] (постоянного геодезического мониторинга обделки в процессе продвижения забоя сбоек к действующему тоннелю).

Выводы.

1. Предложенная методология расчета крепи подземной выработки на основе единой сис-

темы «массив–технология строительства–крепь» позволяет:

- получать полную и объемную картину НДС как всей геосистемы, так и конструкции эксплуатируемого (действующего) подземного сооружения, попадающего в зону влияния горнопроходческих работ;
- вносить конструктивные и технологические изменения в разработанную базовую модель для ее корректировки в процессе строительства.

2. Предложенная методология актуальна при раскрытии выработки вблизи действующих сооружений (влияние приближения забоя к эксплуатируемому тоннелю очевидно), когда остановка движения железнодорожного транспорта в этом тоннеле невозможна.

3. Описанная методология расчета позволила принять в дальнейшем технические решения, которые отвечают безопасной эксплуатации действующего тоннеля без остановки движения поездов. Отказ от установки в «окна» движения поездов традиционных обязательных охранных мероприятий в действующем тоннеле (от временных металлических арочных кружал) уменьшил трудоемкость на объекте и дал значительный экономический эффект.

[1] *Стовпник С.Н., Осипов А.С.* Исследование флишевого породного массива в условиях строительства Бескидского тоннеля // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 1. С. 10–18.

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

[3] *Амусин Б.З.* Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Амусин Б.З., Фадеев А.Б. – М.: Недра, 1975.

[4] *Щелочкова Т.Н.* Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Методика определения эффективных параметров тоннельных обделок из набрызгбетона», Москва, 2010 г.

[5] *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений, – М., «Недра», 1994 г.

[6] *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, – Красноармійськ, 2016, Випуск № 1(38) – С. 105–114.

[7] *Стовпник С.Н., Осипов А.С., Имашев А.Ж.* Опыт решения задач моделирования и расчета временной крепи подземной выработки в сложных инженерно-геологических условиях проходки на примере строительства Бескидского тоннеля // «Горный журнал Казахстана». – Алматы. – 2018. – № 4.

[8] *Осипов А.С.* Геомеханическое обоснование влияния приближения забоя выработки к эксплуатируемому тоннелю в условиях флишевого сложения пород // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – № 4. – С. 24–29.

[9] СНиП II-44-78 Тоннели железнодорожные и автодорожные. Нормы проектирования.

Надійшла 03.05.2018