

УДК 622.272.6

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕПИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК
В НАБУХАЮЩИХ ГЛИНИСТЫХ МАССИВАХ**

Г. Г. Уяр¹, Дж. О. Аксой²

¹*Кафедра горного дела, Университет Хаджеттепе, Инженерный факультет,
06800, Бейтепе, г. Анкара, Турция*

²*Кафедра горного дела, Университет “Девятого сентября”, Инженерный факультет,
35390, Тинацтепе, г. Измир, Турция*

Представлен прогноз возможной деформации набухающей породы при подземной разработке. Обсуждаются и приводятся результаты применения химического закрепления грунта при помощи силиката мочевины с целью снижения деформации в *U*-образной штольне при разработке набухающего породного массива в подземных шахтах Эйнез, Сома (Турция). Исследован процесс деформаций пород перед вводом химических реагентов, подтверждено применение цифровой модели и сопоставлены условия проведения химического закрепления грунта с результатами полевых исследований. Доказана возможность предотвращения деформации на основе цифровой модели. Проведено экспериментальное исследование по измерению давления в шпуре горной породы для определения модуля деформации до и после введения химического состава. Выполнен анализ цифровой модели на основе результатов натуральных исследований и дана ее оценка.

Химическое закрепление грунта, штанговая крепь, набухающие сжатые породы, деформация

DOI: 10.15372/FTPRPI20180412

Создание туннеля в неустойчивой породе является трудной задачей. Горные породы, содержащие такие минералы, как монтмориллонит, смектит или иллит, подвержены набуханию и расширению при контакте с водой и воздухом. Отмечено, что деформация, происходящая с течением времени, представляет следствие ползучести материалов [1]. Явление ползучести (деформации) впервые изучено во время строительства Симплонского туннеля в Швейцарии [2]. В дальнейшем феномен набухания исследовали различные ученые [3–9]. Общим результатом их работ стало то, что деформации, появляющиеся со временем, приводят к сужению сечения горизонтальной выработки. Как показано в [8, 9], степень деформации при сжатии зависит от геологических условий, прочности горной породы, наличия подземных вод, свойств горной породы и геометрических параметров туннеля. Применение штанговой крепи в условиях набухающих пород может сдержать процесс расширения и ослабить деформационные свойства породы [10].

Разработка системы крепи в условиях набухающих пород может основываться на пассивном методе с сохранением деформации и активном методе, который предотвращает деформацию. Данный метод подразумевает последующее изменение формы туннеля после завершения

процесса деформации и экономически невыгоден, поскольку предполагает: потерю времени, повторные проходческие работы и оплату труда рабочих. Активный метод не имеет подобных отрицательных последствий, однако требует детального анализа многих параметров и точного проектирования. При несоблюдении всех требований последствия могут быть намного хуже, чем при применении пассивного метода. При использовании обоих методов нужно учитывать следующие факторы: потенциал деформации горной породы, технологию крепления горной выработки и последствия при прокладке туннеля.

Задержка в установке системы крепи увеличивает деформацию в набухающих и расширяющихся горных породах. Горная порода движется внутрь туннеля, и напряжение во вмещающем массиве увеличивается, что может привести к обрушению туннеля. В данных условиях важно быстро ограничить контакт зоны вскрытой выработкой с воздухом, так как промедление может привести к усилению деформации.

При прохождении туннеля горное давление передается в направлении от забоя. После выполнения горных работ оно снижается и деформация достигает предельного уровня [1, 11]. В этом случае сечение окружности выработки играет большую роль: оно влияет на состояние забоя туннеля как в случае отсутствия системы крепи, так и при ее наличии [13, 14]. Для пород, склонных к набуханию, сечение окружности очень важно для контроля происходящей деформации. Согласно [15, 16], большинство деформаций происходит за границей забоя. Для набухающих пород крепь должна быть спроектирована с учетом степени расширения и разработана технология крепления горной выработки. После выбора технологии необходимо определить, какая система крепи будет применена. В последнее десятилетие появились исследования по использованию крепи в условиях набухающих пород [17–20]. Предложена стратегия крепления горной выработки с помощью недеформируемой крепи [21–27].

В данном исследовании представлены результаты прогноза скоростного проведения выработки в магистральной галерее, осуществляемого в условиях сильно набухающих глинистых пород. Скорость выработки была увеличена на основании полученных данных в процессе цифрового моделирования и прогнозируемой реальной степени деформации. Результаты оказались относительно сходными.

ОБЩЕЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ОБЛАСТИ

Район Сома (Турция) является участком непрерывных угольных разработок на протяжении более чем 100 лет. Открытые и подземные выработки связаны между собой. Изучаемый участок Эйнез — общеизвестный регион подземной разработки месторождений. Лигнитовое месторождение на юго-востоке Турции содержит группу простирающихся к северо-востоку и юго-западу бассейнов третичных отложений. На материнской породе мезозойской эры расположены несогласно залегающие миоценовые отложения, а на миоценовых слоях согласно напластованы плиоценовые отложения. Кроме того, здесь содержатся два хорошо развитых выделенных лигнитовых пласта KP_1 и KP_2 . Стратиграфия региона Сома в виде свода обобщенных данных отображена на рис. 1 [21]. Подземная разработка угля ведется в осадочных породах неогенового периода к востоку от деревни Эйнез. Месторождение Сома-Эйнез содержит два тонких выделенных лигнитовых пласта KM_2 и KM_3 . В результате угледобычи на глубине 200 м на поверхности обнаружены крупные осыпавшиеся трещины размером 2.0–2.5 м в ширину. Толщина угольного пласта KM_2 варьирует от 25 до 35 м, со средней толщиной извлекаемых запасов около 28 м [21].

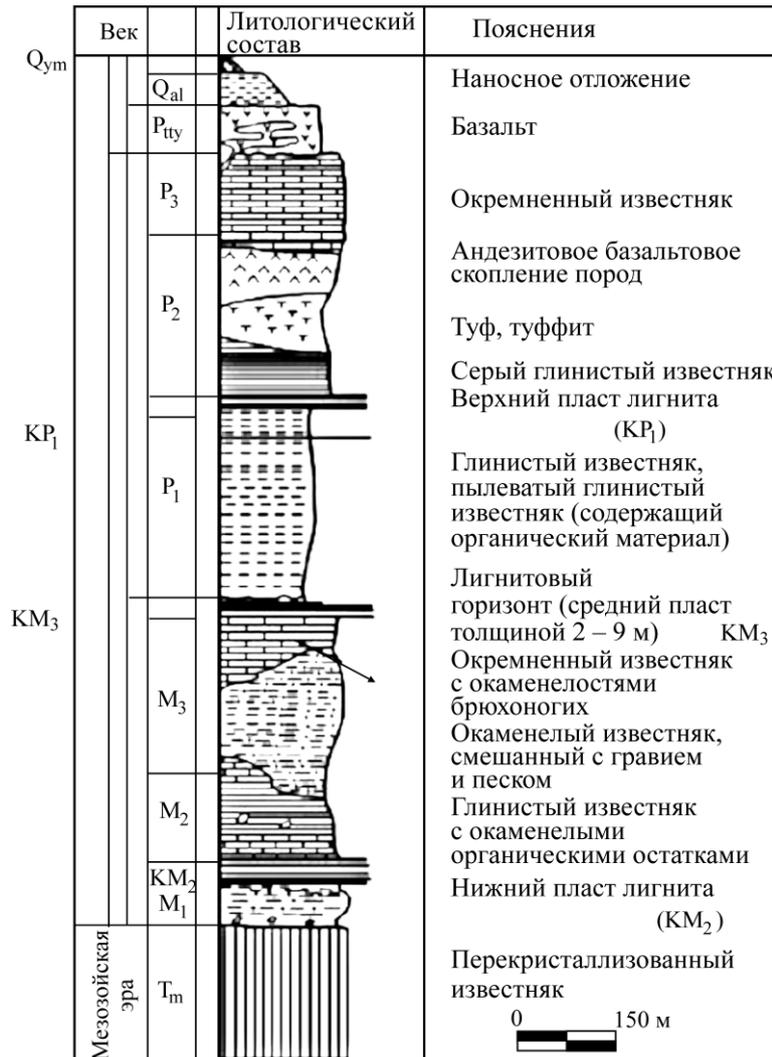


Рис. 1. Обобщенный геологический профиль угольного бассейна в Сома

Проблема большой деформации главной штольни. На территории Эйназа в подземной угольной шахте в Сома проложена 1500-метровая штольня для добычи угля. На участке 850–1150 м находятся сильно набухающие глинистые породы, а на участке между 550 и 650 м наблюдается деформация горных пород. Предполагаемая причина деформации — наличие глинистых минералов в породе. Для определения глинистого состава породы проведен анализ с помощью рентгеновского дефрактометра.

Рентгенодифракционным анализом определялось наличие кварца, мусковита, каолинита/хлорита (клинохлора), группы смектита (нонтронита, монтмориллонита и др.) и анортита. С целью установления присутствия глинистых минералов материалы размером менее 2 мкм были разделены. Затем они были нагреты при температуре 550°C и обработаны этиленгликолем восстановителем. Подготовленные образцы вновь подверглись рентгенодифракционному анализу, в результате которого получены новые данные. Пиковые значения в образцах наблюдались в диапазоне 19.20–11.10 Å, которые увеличились после восстановления этиленгликолем до 23.60–11.83 Å. Преобладающее максимальное значение 10.19 Å выросло. Эти изменения свидетельствуют о том, что размытый максимум является следствием присутствия

глинистых минералов группы смектитов, которые проявляют способность к расширению. Пиковые значения 7.14 и 3.54 Å, принадлежащие хлориту/каолиниту, не изменились после восстановления этиленгликолем, но исчезли при температуре 550°C.

Полученный результат указывает на фазу каолинита, а не хлорита, так как каолинит разлагается при 550°C и становится аморфным. Хлорит же, наоборот, является устойчивым минералом и не подвергается разложению при воздействии такой температуры. Пиковое значение 10.19 Å принадлежит мусковиту в процессе нагревания. Для смектита пиковые значения снизились до 10.19 Å вследствие его разложения при нагревании. Пиковые значения для мусковита (10.19, 5.01, 4.26, 3.34 Å) и кварца (4.26, 3.34 Å) не изменились под воздействием восстановителя и температуры. Результаты показали, что максимальные значения между 19.20 и 11.10 Å в образце увеличились до 23.60 и 11.83 Å после воздействия восстановителя. Данный образец содержал глинистый минерал группы смектитов, который обладает способностью к набуханию различной интенсивности. Выявлено, что разные глинистые минералы могут по-разному проявлять способность к набуханию в породном массиве. Поэтому выбор стратегии при проектировании и установке крепи в процессе проходки является определяющим фактором.

Характеристика породного массива главной галереи. Для определения свойств массива горных пород разработаны эмпирические формулы и методы [28]. Свойства массива, в котором находятся главные магистральные галереи, определялись с помощью пробного бурения и лабораторных опытов (табл. 1). Исследование проводилось на участке 800–1150 м главной магистральной галереи. Параметры, указанные в табл. 1, относятся к слабому породному массиву без химического закрепления грунта.

ТАБЛИЦА 1. Параметры слабых и укрепленных горных пород

Участок главной магистральной галереи, м	Глубина, м	γ , г/см ³	σ_{ci}	E_i	ν	m_i	GSI	E_{rm}	c_m	ϕ_m , град	σ_{cm} , МПа
			МПа					МПа			
0+357 ÷ 0+500	50–80	2.5	15	2000	0.3	15	50	614	0.349	45.30	3.176
0+500 ÷ 0+620	80–100	2.5	15	2000	0.3	15	40	319	0.290	42.33	2.565
0+620 ÷ 0+800	100–150	2.5	10	1500	0.3	10	35	170	0.295	29.32	1.243
0+800 ÷ 1+010	150–220	2.65	60	18000	0.3	25	70	13191	1.950	56.92	24.695
0+800 ÷ 1+010	150–220	2.65	5	1500	0.3	15	25	89.8	0.265	22.40	0.59
1+010 ÷ 1+150	220–360	2.45	5	1250*	0.35	10	20	57.1	0.196	18.16	0.406
1+150 ÷ 1+600	360–425	2.45	35	4000	0.3	20	65	2527	1.800	46.05	11.667
1+150 ÷ 1+600	360–425	2.45	10	1500	0.3	10	30	122	0.486	21.09	1.096

* Даны значения расчетов, так как невозможно получить стандартные образцы

При заходке в главную магистральную галерею применена закачка силиката мочевины для остановки процесса деформации породного массива. Закачиваемая смесь получена при смешивании воды и химического реагента в соотношении 1:1. Закачка выполнялась через каждые 1.5 м. Во время проведения данной операции в стене галереи были просверлены отверстия Ø 38 мм и глубиной 3 м и установлен насос. Насос закачивал химическую смесь под давлением 7 бар. Закачка химической смеси продолжалась до тех пор, пока раствор не появлялся в другом месте. Схема применения химических инъекций представлена на рис. 2.

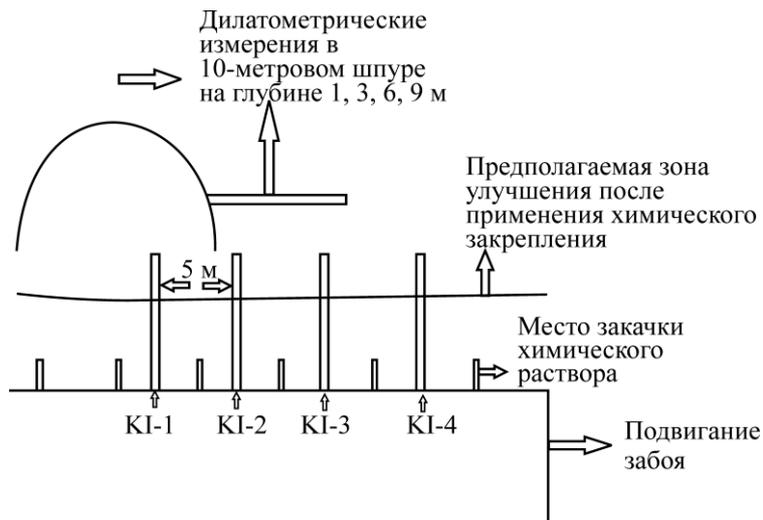


Рис. 2. Принципиальная схема химического закрепления грунта

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Для определения модуля деформации породного массива осуществлены натурные испытания путем измерения давления в шпуре горной породы. Тесты проводились до и после закачки химической смеси. Испытанию подвергались контрольные отверстия $\varnothing 75$ мм, просверленные на глубине 1, 3, 6 и 9 м. Измерительный прибор показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид прессиометра для измерения давления в шпуре

Опыты выполнялись непосредственно после проходки, но до закачки химической смеси на данном отрезке. Затем через 5 м от начальной точки эксперименты повторялись после закачки химического раствора. Основная схема проведения эксперимента включала следующие фазы: 1) проходка и установка крепи в пункте KI-1; 2) измерение объемных изменений в породе при помощи дилатометра в пункте KI-1; 3) закачка химической смеси в пункте KI-1; 4) проходка и установка крепи на 2, 3, 4, 5-м метре; 5) закачка химического раствора в пункте KI-2, где осуществлялась 5-метровая проходка, установление крепи; 6) измерение объемных

изменений в пункте КИ-2 после закачки химического раствора; 7) на расстоянии 5 м от пункта КИ-2, в пункте КИ-3 измерение объемных изменений перед закачкой химического раствора; 8) повторение фаз 2, 3, 4 и 5 для пунктов КИ-3 и КИ-4; 9) измерение объемных изменений в пункте КИ-4 после закачки химического раствора.

В главной магистральной галерее измерены давления в шпуре на глубине 1, 3, 6 и 9 м в пунктах КИ-1, КИ-2, КИ-3 и КИ-4. Полученные значения модуля деформации горной породы приведены в табл. 2. Эти значения использовались также для цифрового моделирования, описанного в следующем разделе. После опытов была проведена оценка измененной части породного массива на глубине около 6 м.

ТАБЛИЦА 2. Модуль деформации породы, полученный путем измерения давления в шпуре, МПа, показывающий улучшение в зоне закачки химической смеси

Глубина, м	КИ-1	КИ-2	КИ-3	КИ-4
1	121.30	122.41	119.91	125.32
3	122.07	125.11	128.33	135.11
6	123.33	126.01	127.97	136.10
9	55.16	58.45	61.20	56.83

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТА В СРАВНЕНИИ СО ШТАНГОВОЙ КРЕПЬЮ

Для предотвращения сильной деформации в Эйнезской подземной угольной шахте рассматривались следующие альтернативные решения: изменение поперечного сечения галереи и придание ему округлой формы; использование только химического закрепления и применение химического закрепления и штанговой крепи в округлом поперечном сечении.

Проведено исследование цифрового моделирования для определения подходящего метода; рис. 4 наглядно демонстрирует принципы цифрового моделирования, а табл. 3 описывает фазы проходки и типы крепи в цифровом моделировании, рассматривая ситуацию до и после применения химического закрепления. Разработанная новая система крепи представлена на рис. 5.

Для цифрового моделирования использовано программное обеспечение PLAXIS 3D Tunnel [31]. Стадии экскавации и установки крепей: фаза 1 — определение исходных условий и принятие мер по остановке процесса деформации; 2 — 0.75 м (1.00 м) проходка; 3 — установка крепи на участке проходки; 4 — 0.75 м (1.00 м) проходка; 5 — установка крепи на участке проходки, ..., 10 — 0.75 м (1.00 м) проходка; 11 — установка крепи на участке проходки (в скобках указано значение для случая подвигания забоя).

Проблема сильной деформации не могла быть решена только при помощи цифрового моделирования. Породный массив обрушился на первой стадии проходки. Во время проведения выработки появилась горизонтальная деформация размером 410 мм со стороны крепи в галерее, вертикальная деформация размером 640 мм обнаружена в верхней части галереи. Эти данные подтверждены натурными измерениями.

В случае применения только химического закрепления образовалась вертикальная деформация размером 240 мм у крепи в кровле и горизонтальная деформация на боковой стене выработки размером 365 мм. У основания крепи обнаружено набухание размером 390 мм. В данном случае степень деформации оказалась очень высокой, что потребует в дальнейшем перепроектирования и корректировки крепи. После установки штанговой крепи на 0.75 м и закачки химической смеси вертикальная деформация у крепи кровли составила 60 мм, горизонтальная на боковой стене — 95 мм. Район, закрепленный рамочной крепью стал более устойчивым. Из-за сжатия в конструкции крепи появилась вертикальная деформация в основании штольни в виде выпирания на 160 мм.



Рис. 4. Принцип цифрового моделирования [29]

ТАБЛИЦА 3. Фазы проведения выработки и элементы крепи, применявшиеся в цифровом моделировании

Фаза	Подвигание забоя, м	Стальная крепь	Штанговая крепь	Торкрет-бетон
До применения химического закрепления и штанговой крепи	0.75	ТН-34	Только в рамной крепи 20 SN	Класс С-35 20 см
После применения химического закрепления и штанговой крепи	В начале 0.75 Позднее 1.0	GI-200	В рамной и боковой крепи ИВО (элемент 1 × 1 м; 4 м в рамке и 6 м по бокам). При необходимости устанавливается на почву	Класс С-35 (5+10+15 см) не менее 30 см торкрет-бетона

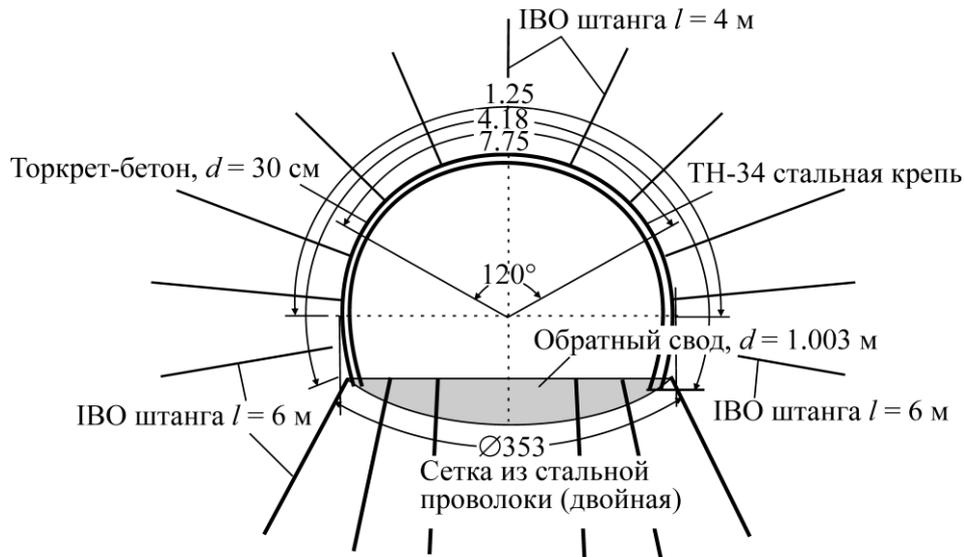


Рис. 5. Новый проект системы крепи [30]

Разработанная цифровая модель позволила определить, нужна ли переустановка системы крепи после проведенных операций. Согласно данным анализа цифровой модели, деформация кровли галереи составила 85 мм, а горизонтальная деформация стены — 116 мм. Вертикальная деформация в основании галереи в форме выпуклости достигла 228 мм. В табл. 4 приведены результаты цифрового моделирования установки крепей.

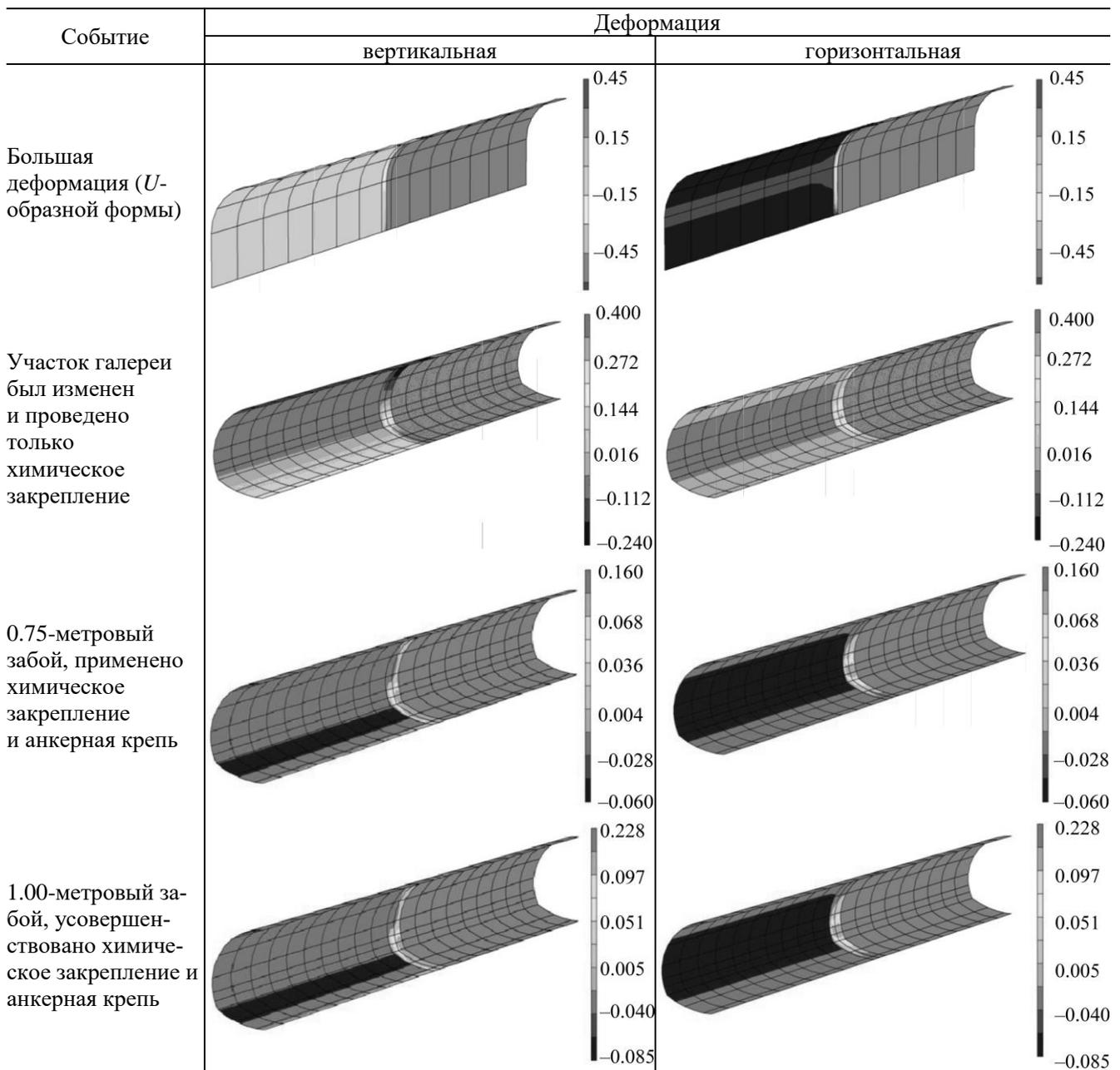
Зона действия химического закрепления по результатам натурных измерений при помощи дилатометра составила 6 м, данное значение использовалось в разработке цифровой модели. Из-за больших деформаций в главной магистральной галерее Эйнезской подземной угольной шахты компания была вынуждена прибегнуть к изменению формы системы крепи. Был разработан план по проектированию округлой формы сечения галереи и рассмотрена возможность применения анкерной крепи. Согласно оценке данных, полученных в натурных условиях, эти меры оказались недостаточными и впоследствии было применено химическое закрепление с использованием силиката мочевины для укрепления горной породы. Значения измерений давления горной породы в шпуре послужили для определения модуля деформации в массиве до и после закачки химического раствора. Экспериментальные данные впоследствии также использовались в цифровом моделировании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты цифрового моделирования были сопоставлены со значениями деформации, полученными при натурных измерениях. Цифровое моделирование дало возможность увеличить скорость проходки горной выработки. Выявлено, что увеличение скорости проходки не имело негативных последствий. Значения модуля деформации, полученные при натурных измерениях после увеличения сечения штольни с 0.75 до 1 м, соответствовали результатам цифровой модели.

В ходе проведенных исследовательских работ установлено, что химическое закрепление с помощью силиката мочевины увеличило модуль деформации горной породы и усилило пластическую зону. Применение химической смеси способствовало снижению деформации даже при увеличении скорости проведения выработки.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение сценариев развития событий при установке крепи



Данное исследование послужило примером проектирования устойчивой крепи в штольнях при работе с породами, имеющими склонность к деформациям (сильно набухающими породами). Сравнение результатов цифрового моделирования и натуральных измерений представлено в табл. 5.

Значения, приведенные в табл. 5, могут показаться завышенными, но они обусловлены содержанием глинистых минералов в породе, имеющих тенденцию к набуханию. Главная задача при работе в подземной шахте — остановка процесса деформации в породе и обеспечение стабильных условий для длительных работ. Кроме того, наиболее затратным и длительным процессом при подземной разработке является повторение одних и тех же работ. В результате исследования удалось добиться устойчивого состояния галерей.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение результатов цифрового моделирования деформаций и измеренных в натуральных условиях, мм

Участок и система крепи	Цифровое моделирование			Натурные измерения		
	Боковая часть	Верхняя часть	Основание	Боковая часть	Верхняя часть	Основание
Большая деформация (U-образной формы)	410	640	Провал	445	650	Провал
Участок галереи изменен и проведено только химическое закрепление	365 (внутри галереи)	240 (проседание)	390 (выпирание)	—	—	—
0.75-метровый забой, применено химическое закрепление и анкерная крепь	95 (внутри галереи)	60 (проседание)	160 (выпирание)	87 (внутри галереи)	64 (проседание)	148 (выпирание)
1.00-метровый забой, усовершенствовано химическое закрепление и анкерная крепь	116 (внутри галереи)	85 (проседание)	228 (выпирание)	105 (внутри галереи)	81 (проседание)	203.5 (выпирание)

ВЫВОДЫ

Проведение горных выработок в породе, имеющей повышенную способность к деформации, всегда представляет большую трудность. Для решения данной проблемы существуют различные пути, среди которых можно выделить разработку элементов и систем крепи.

В данном исследовании вместо усиления элементов крепи предпочтение отдано химическому закреплению горной породы, увеличивающему модуль деформации, укрепляющему зону пластичности и приводящему к снижению вероятности набухания породы. Кроме того, спроектирована штанговая крепь, оказывающая влияние на внутренние параметры массива горных пород. Деформации, проанализированные с помощью цифровой модели, а также натурные измерения подтвердили целесообразность применения разработанной методики крепи. Таким образом, создание искусственного слоя вокруг галереи способствует укреплению зоны пластичности. Оценка цифровой модели показала, что деформация горной породы остановлена и проходка штольни завершена благодаря применению химического закрепления грунта и созданию системы штанговой крепи на границе участков выработки.

Авторы выражают благодарность горнодобывающей компании “Imbat” за оказанную материальную и техническую поддержку в проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barla G. Squeezing rocks in tunnel, Int Soc. Rock Mech. News J., 1995, 2 (3–4). — P. 44–49.
2. Wiesmann E. Mountain pressure, Switzerland J. Struct., 1912, 60 (7) [in German].
3. Terzaghi K. Rock defects and loads on tunnel supports, Rock Tunneling with Steel Supports, 1946, Vol. 1, Proctor R. V. and White T. L. (eds.), Commercial Shearing and Stamping, Youngstown, OH. — P. 15–99.
4. Singh B., Jethwa J. L., Dube A. R., and Singh B. Correlation between observed support pressure and rock mass quality, Tunnel Underground Space Technol, 1992, 7 (1). — P. 59–74.
5. Aydan O., Takagi T., and Kawamoto T. The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction, Rock Mech. Rock Eng., 1993, 26 (2). — P. 137–163.

6. **Dube A. K.** Squeezing under high stress conditions, assessment and prevention of failure phenomena in rock engineering, *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Passmehmetoglu A. K. et al. (eds.), Rotterdam, Balkema, 1993. — P. 751–757.
7. **Schubert W. and Schubert P.** Tunnels in squeezing rock: failure phenomena and counteractions, *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, ISRM Int. Symp., Istanbul (Turkey), 1993. — P. 479–484.
8. **Dalgic S.** Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey, *Engineering Geology*, 2002, 67. — P. 73–96.
9. **Yassaghi A. and Salari-Rad H.** Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal Freeway, Iran: a case study, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Scien.*, 2005, 42. — P. 95–108.
10. **Einstein H. H. and Belward P.** Elasto-plastic constitutive model, *Proc. 6th Int. Congr. on Rock Mech.*, Montreal, 1987. — P. 1487–1492.
11. **Panthi K. K. and Nilsen B.** Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Scien.*, 2007, 44. — P. 67–76.
12. **Lee Y. Z. and Schubert W.** Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23. — P. 221–231.
13. **Chang Y.** Tunnel support with shotcrete in weak rock—a rock mechanics study, Ph. D. Dissertation, Stockholm, Royal Institute of Technology, 1994.
14. **Baudendistel M.** Significance of the unsupported span in tunneling, *Tunnelling*, 2009, 85. — P. 103–108.
15. **Hoek E.** Big tunnels in bad rocks, *ASCE J. Geotech Geoenviron Eng.*, September, 2008. — P. 726–740.
16. **Panthi K. K.** Analysis of engineering geological uncertainties related to tunnelling in Himalayan rock mass conditions, PhD Dissertation, Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway, 2006.
17. **Anagnostou G. and Cantieni L.** Design and analysis of yielding support in squeezing ground, 11th Congress of the Int. Soc. for Rock Mechanics, Lisbon, 2007. — P. 829–832.
18. **Barla G.** Innovative tunneling construction method to cope with squeezing at Saint Martin La Porte access adit (Lyon-Torino Base tunnel), *Rock Engineering in Difficult Conditions in Soft Rocks and Karst*, Proceedings of Eurock, ISRM Regional Symp., Dubrovnik, Croatia, 2009.
19. **Cantieni L. and Anagnostou G.** The interaction between yielding supports and squeezing ground, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24. — P. 309–322.
20. **Barla G., Bonini M., and Semeraro M.** Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26. — P. 146–154.
21. **Aksoy C. O., Köse H., Onargan T., Koca Y., and Heasley K.** Estimation of limit angle by laminated displacement discontinuity analyses in Soma coal field, Western Turkey, *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science*, 2004, 41(4). — P. 547–556.
22. **Aksoy C. O., Onargan T., Yenice H., Küçük K., and Köse H.** Determining the stress and convergence at Beypazari trona field by three-dimensional elastic-plastic finite element analysis: A case study, *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43 (2) . — P. 166–178.
23. **Aksoy C. O.** Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by ground water drainage: A case study, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Scie.*, 2008, 45 (3) . — P. 376–383.
24. **Aksoy C. O.** Review of rock mass rating classification: historical developments, applications, and restrictions, *J. of Min. Scie.*, 2008, 44 (1). — P. 51–63.

25. **Aksoy C. O. and Onargan T.** The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25 (5) . — P. 553–559.
26. **Aksoy C.O., Özacar V., and Kantarci O.** An example for estimation of rock mass deformations around an underground opening by numerical modeling, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2010, 47 (2) . — P. 272–278.
27. **Aksoy C. O., Ogul K., Topal I., Ozer S. C., Ozacar V., and Posluk E.** Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 52. — P. 61–70.
28. **Aksoy C. O., Geniş M., Uyar Aldaş G., Özacar V., Özer S. C., and Yılmaz Ö.** A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches, *Engineering Geology*, 2012, 131–132. — P. 19–28.
29. **Yasitli N. E. and Unver B.** 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Scien.*, 2005, 42. — P. 219–235.
30. **Aksoy C. O., Ogul K., Topal I., Poşluk E., Gicir A., Kucuk K., and Uyar Aldas G.** Reducing deformation effect of tunnel with non-deformable support system by jointed rock mass model, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40. — P. 218–227.
31. **Plaxis 3D Tunnel V2**, User manual, 2007.

Поступила в редакцию 4/IV 2018