

УДК 622.831

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ ОТРАБОТКЕ НИЖНИХ ПЛАСТОВ СВИТЫ**

С. В. Риб, О. А. Петрова, А. М. Никитина, В. А. Волошин, В. Н. Фрянов

*Сибирский государственный индустриальный университет,
E-mail: fryanov@sibsiu.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия*

Описаны особенности отработки свиты угольных пластов. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке нижних пластов свиты с учетом влияния угольных целиков и выработок на верхних пластах. Рассмотрены различные варианты расположения подготовительной выработки на нижнем пласте свиты, охраняемой целиком. Выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния массива горных пород, адаптированный к условиям шахт юга Кузбасса, на основе которого осуществляется выбор наиболее безопасного с геомеханической точки зрения варианта расположения подготовительной выработки.

Угольный пласт, свита, напряжения, смещения, зона повышенного горного давления, массив горных пород, выработка, остаточная прочность, целик

DOI: 10.15372/FTPRPI20230606

По мере развития угольной промышленности в основных горнодобывающих районах России происходит постепенное снижение объемов балансовых запасов полезных ископаемых для отработки их с применением традиционных технологий, чему способствуют следующие факторы:

- сокращение доли разведанных геологических запасов, выборочная отработка которых возможна по традиционным технологиям;
- ограничение поставок нового импортного горно-шахтного оборудования в связи с мировыми санкционными процессами;
- усложнение горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ из-за негативного влияния глубины разработки, геологических нарушений разрывного типа, зон повышенного горного давления, микросейсмических воздействий, повышенного выделения метана в горные выработки, склонности угольных пластов к динамическим явлениям, пространственной изменчивости и неоднородности свойств угля и пород, склонности угля к самовозгоранию.

В связи с воздействием указанных факторов уровень безопасности и технико-экономические показатели на горнодобывающих предприятиях весьма низкие, что подтверждается результатами статистического анализа причин приостановок деятельности угледобывающих предприятий [1].

Особую опасность представляет отработка свиты пластов на угольных шахтах. В силу специфики применяемой столбовой системы разработки на вышележащих пластах остаются целики угля для охраны выработок, что негативно влияет на состояние нижележащих пластов угля вследствие образования зон повышенного горного давления. Горное давление, формируемое оставленными целиками угля на отрабатываемых выше пластах, накладывается на горное давление, возникающее от очистного забоя на нижележащем угольном пласте. Как следствие, это существенно влияет на динамику геомеханических процессов: изменение физико-механических свойств массива горных пород, деформация горных пород в зоне повышенного горного давления; склонность массива горных пород или его части к динамическим явлениям; вывалы и обрушения в горных выработках и др. Вследствие этого при проектировании отработки свит пластов длинными столбами обосновываются: очередность отработки пластов в свите; параметры подготовки выемочных участков; взаимное расположение целиков на сближенных пластах [2–4]. Расположение выемочных выработок в зонах повышенного горного давления приводит к потере их устойчивости, необходимости проведения дорогостоящих ремонтных работ или проведения новой выработки, а также к простоям высокопроизводительного очистного оборудования [5, 6].

Учет последовательности выемки угольных пластов дает возможность оценки напряженного состояния в зонах опорного давления, сформированных на разных этапах отработки. Одновременное ведение очистных работ в сближенных пластах вызывает уменьшение уровня напряжений в зоне опорного давления вышележащего пласта по сравнению с вариантом их последовательной отработки [7, 8]. При отработке запасов по схеме “шахта–лава” проблемы в зонах повышенного горного давления становятся актуальными с переходом к отработке смежного пласта в свите. Это характерно для большинства угольных шахт не только в России, но и за рубежом [9, 10].

Нормативные документы в области подземной отработки свиты пластов [11, 12], выпущенные в прошлом веке, не в полной мере отвечают современным условиям разработки месторождений полезных ископаемых и не позволяют всецело учитывать фактическое изменение технической оснащенности шахт, быстро меняющуюся геомеханическую ситуацию, повышение нагрузок на очистные забои и увеличение скоростей проходки.

Недостаточная изученность геомеханических процессов, происходящих в горном массиве при взаимном влиянии очистных, подготовительных выработок и целиков при отработке свиты пластов затрудняет прогноз устойчивости горных выработок.

Для решения вопросов взаимного расположения выработок и целиков на пластах свиты актуальна численная оценка напряженно-деформированного состояния массива и его изменений по мере развития горных работ. В [13] описаны преимущества объединения геомеханического и геофизического мониторингов на шахтах при отработке свиты угольных пластов. Такой подход снабжает механические расчеты богатой информацией и дает ясную интерпретацию данным сейсмических наблюдений. В итоге совершенствуется база для принятия геомеханически обоснованных решений, связанных с планированием развития горных работ, прогнозом и предупреждением вредных последствий горного давления.

Цель настоящей работы — исследование закономерностей развития процессов деформирования массива горных пород при выемке свиты угольных пластов для обеспечения эффективности и безопасности их отработки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При выполнении работы были решены следующие задачи:

- сбор исходных данных и обобщение опыта отработки запасов угля на шахте;
- разработка цифровой модели геомассива с системой горных выработок и формирование исходных файлов компьютерного программного обеспечения;
- численное моделирование геомеханических процессов методом конечных элементов;
- анализ результатов моделирования для обоснования технологических решений по отработке участков шахтных полей в сложных геомеханических условиях выемки свиты пластов.

При проведении вычислительных экспериментов исследуемая область массива горных пород в виде вертикального разреза всей толщи разделяется на 40 400 конечных элементов. Принимается во внимание слоистая неоднородная структура породных слоев и угольных пластов согласно реальной стратиграфии и литологии, учитываются прочностные и деформационные свойства угольных пластов и породных слоев.

Форма и размеры выработок, разрывные нарушения, контакты породных слоев и угольных пластов учитываются в модели посредством ввода в задание их контуров в глобальной системе координат. Для повышения точности расчетов размеры сторон конечных элементов вблизи выработок, нарушений и на контактах между соседними слоями были приняты равными 0.05 – 0.50 м, а угольные пласты и боковые породы делились на подслои.

В качестве объекта исследований принята ООО “Шахта “Юбилейная” в Кузбассе. Для проведения математического моделирования методом конечных элементов при решении задач использован авторский комплекс программ CoalPillar [14, 15]. Он предназначен для моделирования процессов изменения смещений, напряжений и деформаций под влиянием природных полей напряжений и горных выработок в углепородном массиве. Программы выполнены на языке Фортран в среде программирования Microsoft Developer Studio. Визуализация и обработка полученных результатов проводилась с помощью программы Surfer.

На рис. 1 представлена геометрическая цифровая модель массива горных пород и системы горных выработок. Модель идентифицирует параметры массива горных пород по каждому слою или пласту: мощность, предел прочности при сжатии и модуль деформации пород и угля, координаты точек пересечения осей геологоразведочных скважин и породного слоя или пласта. Горные выработки задавались в виде контуров с указанием типа крепи. Расчетная область имеет форму прямоугольника с размерами по горизонтали 1100 м, по вертикали 650 м.

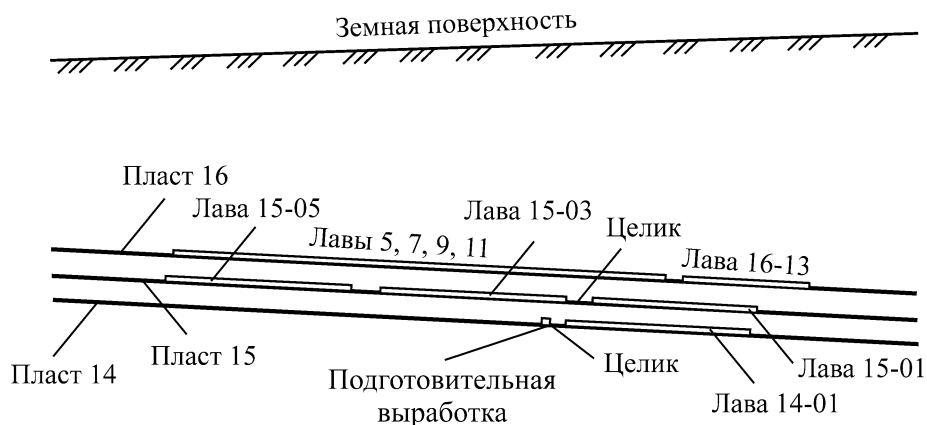


Рис. 1. Геометрическая модель массива горных пород и системы горных выработок

Исходное напряженно-деформированное состояние массива горных пород формировалось за счет осадочных процессов и обусловлено преимущественно весом налегающих пород, в целом соответствуя гипотезе А. Н. Динника. На контуре области расчета приняты следующие граничные условия:

- на левой и правой границах расчетной области горизонтальные смещения и касательные напряжения равны нулю;
- на нижней границе расчетной области вертикальные смещения и касательные напряжения равны нулю;
- верхняя граница расчетной области свободна от внешней нагрузки.

Физико-механические свойства вмещающих пород и угля выбраны в соответствии с данными соответствующих геологических и справочных материалов [16, 17]. На границах пород с различными свойствами приняты условия жесткого контакта. Физико-механические свойства угля и пород приведены в таблице.

Физико-механические свойства угля и пород

Состав угленосной толщи	Плотность, т/м ³	Коэффициент крепости по Протоdjяконову	Предел прочности при одноосном, МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Коэффициент Пуассона
			сжатии	растяжении		
Песчаник	2.70	10.0	100	10.0	2.5	0.25
Алевролит	2.65	6.0	60	5.6	2.5	0.26
Аргиллит	2.65	3.0	35	4.0	1.8	0.27
Пласт угля 16	1.26	1.3	13	1.3	0.6	0.30
Алевролит	2.65	6.0	60	5.6	2.5	0.26
Пласт угля 15	1.26	1.3	13	1.3	0.6	0.30
Алевролит	2.65	6.0	60	5.6	2.5	0.26
Пласт угля 14	1.27	1.3	13	1.3	0.6	0.30
Алевролит	2.65	6.0	60	5.6	2.5	0.26

Исследовано влияние пространственного положения выработок относительно целиков на их устойчивость в условиях ООО “Шахта “Юбилейная”. Определены пласты свиты 14, 15 и 16 средней мощности — 1.5, 1.8 и 1.6 м соответственно. Мощность междупластья составляет 48 и 52 м.

Рассмотрена следующая горнотехническая ситуация. Горная выработка (конвейерный штрек 14-03) проводится по нижнему пласту 14 свиты и охраняется от выработанного пространства целиком угля (рис. 1). Вышележащий пласт 16 свиты отработан. На среднем пласте 15 свиты после отработки трех выемочных столбов (лавы 15-01, 15-03, 15-05) остались целики, являющиеся штампами для выработок на пласте 14. Глубина залегания пласта 14 540 м. Расчеты выполнены для четырех вариантов расположения конвейерного штреха 14-03 (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования выявлялись закономерности распределения вертикальных, горизонтальных напряжений и смещений в массиве горных пород, а также отношение остаточной прочности угля и пород к исходной [18]. Задача решена в условиях плоской деформации.

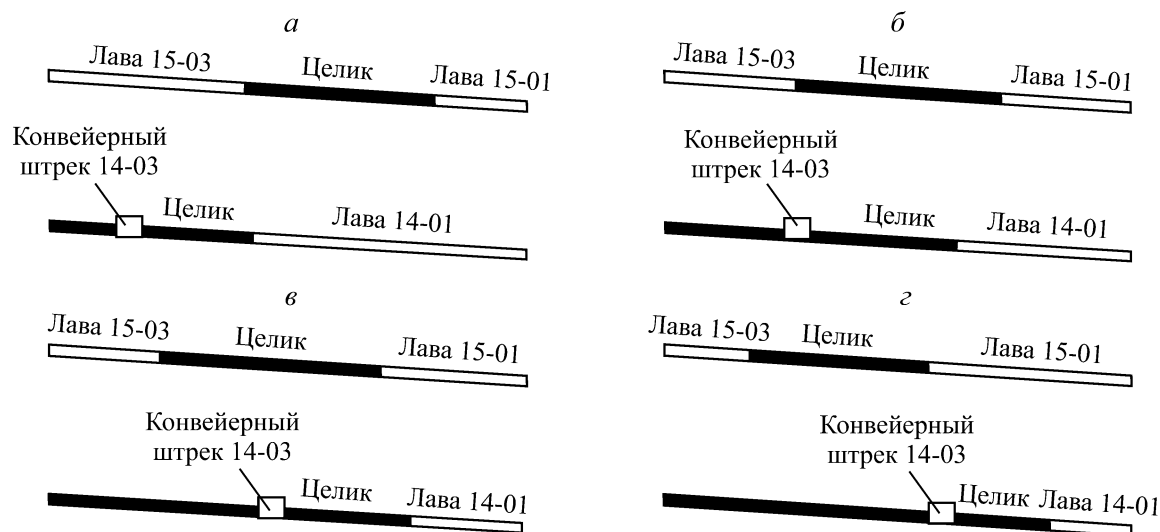


Рис. 2. Схемы расположения конвейерного штрека 14-03: а — под выработанным пространством отработанного выемочного столба 15-03 верхнего пласта 15; б — под краевой частью целика по восстанию между выработанными пространствами выемочных столбов 15-03 и 15-01; в — под целиком в середине; г — под краевой частью целика по падению

Для обоснования количественной оценки состояния угля и пород в шахтных условиях проведены визуально-инструментальные наблюдения за состоянием боков и кровли подготовительных выработок выемочного участка шахты. В выработках оборудованы по три наблюдательные станции. Установлено, что в окрестности штреков образуются зоны с различными видами деформационных процессов, которые приводят к смещению контура горной выработки. Для горно-геологических и горнотехнических условий проведения шахтных измерений выполнен расчет параметров напряженно-деформированного состояния. Расчетные значения напряженно-деформированного состояния угля и пород сравнивались с фактическим измеренным отжимом угля. В качестве критерия разрушения при математическом моделировании использовалось отношение остаточной прочности угля и пород к исходной. Отношение остаточной прочности угля и пород к исходной определялось по паспорту прочности Кулона – Мора: $K_{ост} = \tau_{пасп} / \tau_{МКЭ}$ ($\tau_{пасп}$ — касательные напряжения по паспорту прочности породы; $\tau_{МКЭ}$ — касательные напряжения, вычисленные методом конечных элементов).

На основе сравнения результатов математического моделирования и шахтных измерений деформаций пород кровли по глубинным реперам, значения отжима угля с боков выработки и вывалов пород кровли выявлено, что отношения остаточной прочности угля и пород к исходной соответствуют следующим состояниям:

- когда $K_{ост} > 0.7$ уголь и порода находятся в устойчивом состоянии;
- при $0.5 < K_{ост} < 0.7$ уголь и порода на контуре выработки находятся в упруго-пластическом состоянии, т. е. проявляется трещиноватость, образуются заколы, деформируются элементы крепи;
- при $K_{ост} < 0.5$ уголь и порода частично разрушены, появляются вывалы породы и угля.

Распределение отношения остаточной прочности горных пород к исходной $K_{ост}$ и дополнительных вертикальных смещений для четырех вариантов расчета представлены на рис. 3, 4. Высота штрека 3 м, ширина 4 м.

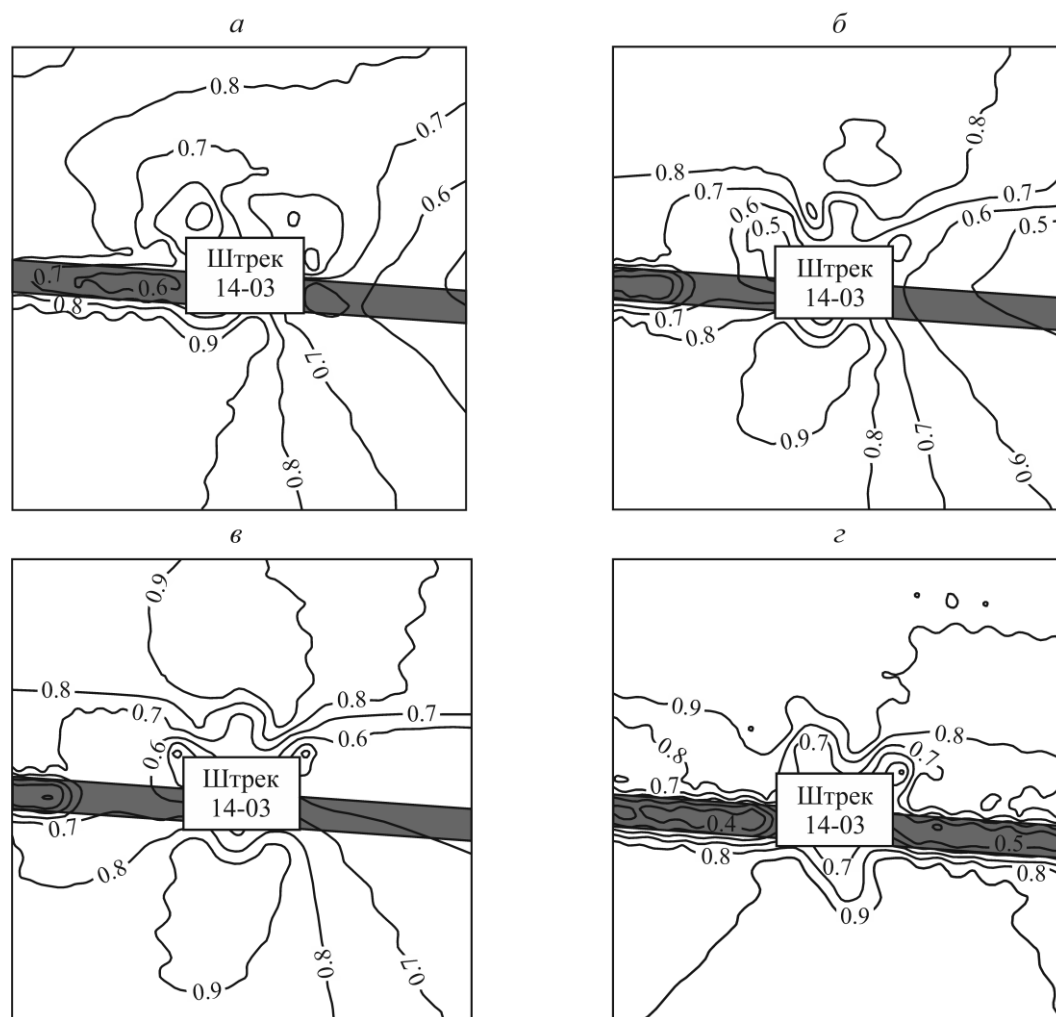


Рис. 3. Изолинии отношения остаточной прочности к исходной в окрестности конвейерного штрека 14-03: а — первый вариант расчета; б — второй; в — третий; г — четвертый

В первом варианте расчета (конвейерный штрек расположен под очистным выработанным пространством пласта 15) формируется безопасная геомеханическая ситуация, наблюдается асимметричная картина зоны разрушения со смещением максимума в сторону восстания пласта (рис. 3а). Конвергенция кровли и почвы выработки составила ~ 60 мм (рис. 4а). Во втором варианте (конвейерный штрек расположен под границей целика пласта 15 со стороны восстания пластов) в окрестности штрека зона разрушения пород определяется со стороны угольного массива в верхнем углу (рис. 3б). Конвергенция кровли и почвы выработки составила ~ 150 мм (рис. 4б). В третьем варианте расчета (конвейерный штрек расположен под целиком) отмечается симметричное распределение зоны разрушения с максимумом на сопряжении кровли и боков выработки (рис. 3в). Возникает вероятность динамических явлений: горных ударов; внезапных выбросов угля; прорыв метана в выработку и др. Конвергенция в выработке может достигать более 200 мм, что создает трудности ее поддержания анкерной крепью (рис. 4в). Четвертый вариант характеризуется расположением конвейерного штрека под границей целика пласта 15 со стороны падения пластов. Зона разрушения пород наблюдается в окрестности выработки со стороны целика в верхнем углу (рис. 3г). Конвергенция в выработке составила ~ 140 мм (рис. 4г), так как целик, охраняемый выработку, находится под выработанным пространством 15-01 вышележащего пласта.

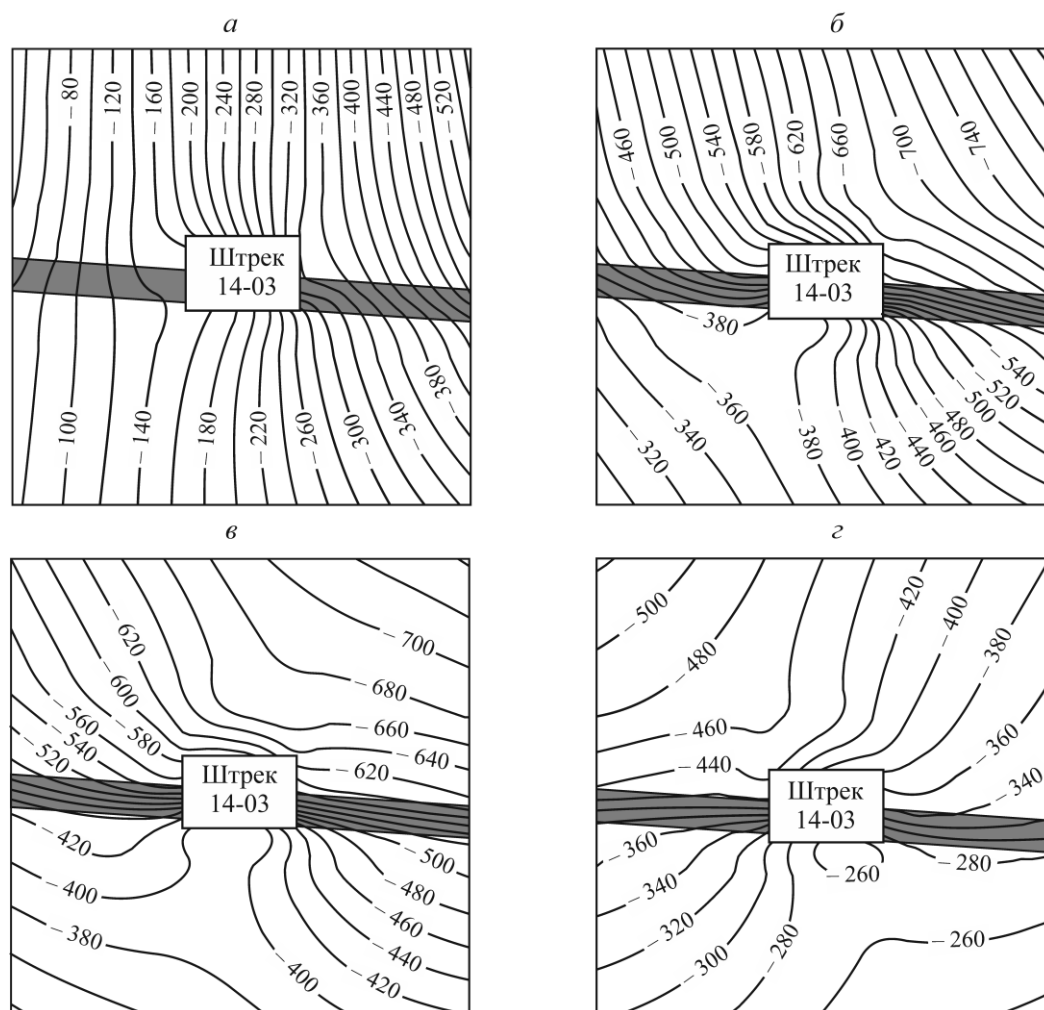


Рис. 4. Изолинии дополнительных вертикальных смещений (мм) в окрестности конвейерного штрека: *а* — первый вариант расчета; *б* — второй; *в* — третий; *г* — четвертый

Количественные параметры дополнительных вертикальных смещений пород соответствуют результатам, полученным в [19], а также действующим Правилам охраны сооружений [20]. Результаты исследований позволяют утверждать, что по количественным параметрам алгоритмы численного моделирования соответствуют реальным представлениям о механизме процесса сдвижения в коренных углевмещающих породах.

ВЫВОДЫ

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке нижних пластов свиты с учетом влияния угольных целиков и выработок на верхних пластах позволила выявить следующие особенности. Горное давление, формируемое оставленными целиками угля на выше отрабатываемых пластах, накладывается на горное давление, формирующееся опорным давлением от очистного забоя на нижележащем угольном пласте, и как следствие, негативно влияет на устойчивость надрабатываемых выработок.

Установлено, что расположение конвейерного штрека пласта 14 под очистным выработанным пространством пласта 15 приводит к наиболее безопасной с геомеханической точки зрения ситуации; при расположении конвейерного штрека под целиком верхнего пласта возникает вероятность проявления динамических явлений.

Оптимальным расположением горной выработки на нижнем пласте свиты является ее проходка в зонах разгрузки от выработанного пространства вышележащих пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подображин С. Н., Стульская Т. В., Зарубина Е. С. О повышении уровня промышленной безопасности на предприятиях угольной промышленности // Без-сть труда в пром-сти. — 2023. — № 3. — С. 40–47.
2. Казанин О. И. О проектировании подземной отработки свит пологих газоносных угольных пластов // Зап. Горн. ин-та. — 2015. — Вып. 215. — С. 38–45.
3. Ремезов А. В., Климов В. В. Исследование влияния опорного давления от очистного забоя и зон ПГД на горные выработки // Вестн. КГТУ. — 2011. — № 4. — С. 40–43.
4. Исаченко А. А., Петрова Т. В., Фрянов В. Н. Закономерности проявления динамических явлений при отработке свит угольных пластов // Изв. ТГУ. Науки о Земле. 2021. — № 2. — С. 311–323.
5. Казанин О. И., Сидоренко А. А., Ермаков А. Ю., Ванякин О. В. Исследование влияния зон повышенного горного давления на показатели работы длинных очистных забоев при отработке свит угольных пластов // ГИАБ. — 2015. — № 4. — С. 21–25.
6. Гладких А. А., Коновалов Л. М., Ремезов А. В. Исследование проявления горного давления в выработках при надработке их лавой // Вестн. КГТУ. — 2008. — № 1. — С. 20–25.
7. Серяков В. М. Расчет напряженного состояния массива в условиях отработки сближенных угольных пластов с плавным опусканием пород кровли // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Вып. 2. — № 3. — С. 318–324.
8. Серяков В. М. Обоснование геомеханических параметров разработки свиты пологих пластов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2017. — № 3. — С. 51–57.
9. Syd S. Peng. Coal mine ground control, West Virginia University, 2008. — 750 p.
10. Tati B. B. Multi-seam coal mining, J. Southern Afr. Inst. Min. Metall., 2011, Vol. 111. — P. 231–242.
11. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на шахтах СССР. — Л., 1986. — 222 с.
12. Указания по управлению горным давлением в очистных забоях под (над) целиками и краевыми частями при разработке свиты угольных пластов мощностью до 3,5 м и углом падения до 35°. — Л.: ВНИМИ, 1984. — 62 с.
13. Зубков В. В., Зубкова И. А. Моделирование геомеханических процессов и их геофизический контроль при отработке свиты угольных пластов // Зап. Горн. ин-та. — 2010. — Вып. 188. — С. 82–86.
14. Св-во о регистрации электронного ресурса. Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга / Д. М. Борзых, С. В. Риб, В. Н. Фрянов. Объединенный фонд электронных ресурсов “Наука и образование”. — 2014. — № 20629.
15. Риб С. В., Басов В. В. Методика численного исследования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков с применением современных компьютерных технологий // Вестн. СГИУ. — 2015. — № 4. — С. 22–26.

16. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
17. Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969. — 392 с.
18. Серяков В. М., Риб С. В., Басов В. В., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 21–29.
19. Кутепов Ю. Ю., Боргер Е. Б. Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе // ГИАБ. — 2017. — № 5. — С. 66–75.
20. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — СПб., 1998. — 291 с.

Поступила в редакцию 06/XI 2023

После доработки 14/XI 2023

Принята к публикации 16/XI 2023