

УДК 622.831.3

**РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В НАЛЕГАЮЩЕМ МАССИВЕ ПОРОД
И ИХ МОНИТОРИНГ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

**Хао Янькуй¹, Ма Чжаньго², Линь Чжунсян¹, Лю Ван²,
Юэ Пэн¹, Сунь Цзюньюй², Чэнь Тао²**

¹Компания “China Coal Geology Group Co. Ltd.”, 100040, г. Пекин, Китай

²Китайский горно-технологический университет, 221008, г. Сюйчжоу, пров. Цзянсу, Китай

Для прогнозирования развития и местоположения разделительной трещины в условиях очистного забоя 8006 угольной шахты на севере Китая представлен расчет напряжений на границах литологического раздела породных слоев исходя из принципа составной балки. С помощью сети оптоволоконных датчиков осуществлен мониторинг слоистых толщ пород, склонных к осадке. Полученные результаты испытаний с высокой точностью отражают характеристики деформаций налегающих пород в поле измерений и представляют теоретические основы для практических рекомендаций по применению тампонажа налегающих пород в рассматриваемой угольной шахте. Результаты исследований показали, что при полной отработке угольного пласта на вертикальном расстоянии 265 м от его кровли образуется разделительная трещина между слоями крупнозернистого песчаника и аргиллита. Цементация, или тампонаж, в таких случаях является эффективным способом укрепления подобных разделительных трещин.

Деформация породы, тампонаж, моделирование методом подобия, добыча угля, деформация налегающей пород

DOI: 10.15372/FTPRPI20240205

EDN: LUTEUW

Технология тампонажа представляет собой нагнетание твердых отходов, например золы-уноса, в виде раствора в полости налегающих пород, образующихся в результате отработки угольного пласта. Тампонаж выполняется для снижения степени деформации налегающих пород и предотвращения их обрушения. Тампонирующий раствор подается в трещиноватый породный массив под давлением. В результате образуется укрепленная область, которая позволяет снизить осадку дневной поверхности. Появление разделительных трещин в массиве налегающих пород — широко распространенная проблема в шахте. Корректное определение механизма динамического развития разделительных трещин позволит не только получить теоретические основы и практические рекомендации для их тампонажа, но и изучить закономерности повреждения водоносных и газосодержащих горизонтов. Детальное изучение сдвижений налегающих пород и выявление механизма развития разделительных трещин является актуальной задачей в настоящее время [1 – 6].

В [7] сделано предположение, что при наличии очистной выработки слои налегающих пород не разрушаются, они формируются как упругая плита и воспринимают нагрузку от вышележащей толщи, что приводит к их осадке и изгибанию. Это свидетельствует о начале процесса разделения литологических слоев налегающих пород относительно друг друга. В [8] выполнено упрощение области разделения слоев налегающей геологической толщи до треугольного участка. Предложен метод определения состояния на границе раздела пород на основе пошаговой корреляции и объединения, а также рассмотрена механическая модель ступенчатой составной балки, позволяющая рассчитать динамическое развитие магистральной трещины. В [9] на базе основного уравнения прогиба плиты показано, что координированное сдвижение налегающих пород носит характер деформации составной плиты. Выявлено местоположение раздельной трещины путем определения напряжений на границах раздела между слоями. На основе теории упругой плиты получены уравнения линий изгиба при различных граничных условиях. В [10] предположено, что разделение между двумя соседними породными слоями происходит за счет развития выработанного пространства при очистной выемке с разницей коэффициента Платинори более 2. Предлагаемая методика выявления местоположения раздельной трещины включает классификацию налегающих пород по литологическому составу, выявление возможного местоположения, расчет изгиба породного массива, определение слоистых толщ с раздельной трещиной. В [11] на примере Донецкого каменноугольного бассейна предложен метод прогнозирования образования раздельной трещины на основании комплексного критерия, учитывающего физические характеристики угольно-породного массива. В [12] на основе критериев разрушения Гриффита и Мора-Кулона выдвинуто предположение: если слой горной породы изгибается и оседает по принципу составной балки, то на поверхности литологического раздела образуется раздельная трещина под воздействием растяжения или сдвига. Представлены теоретические принципы образования раздельной трещины деформацией сдвига.

Образование трещин в горных породах исследуется на протяжении длительного времени, в том числе в рамках применения технологии тампонажа или гидроразрыва горных пород. Однако данная тематика не теряет своей актуальности и требует дальнейшего изучения по причине трудности обнаружения раздельных трещин и сложности напряженно-деформированного состояния [13 – 16].

В настоящей работе рассмотрен механизм образования и развития раздельных трещин с позиции действующих напряжений на поверхностях литологических разделов между породными слоями на примере очистного забоя 8006 в угольной шахте на севере Китая. Предложены теоретические основы определения размеров трещин и выявлены закономерности их развития.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Очистной забой 8006 — первая добывающая лава в районе № 80 со средней высотой 5.5 м, шириной 280 м, общей длиной 1200 м при угле падения 2~12°. Отрабатываемый угольный пласт № 3 относится к практически горизонтальным. Глубина его залегания составляет около 620 м. Отработка угольного пласта методом обрушения полностью механизирована. Геологические условия кровли позволяют использовать метод обрушения на всю высоту пласта. Над шахтой расположены высоковольтная опора ЛЭП, сигнальный пост и другое оборудование, перемещение которых представляет собой трудоемкую и затратную операцию. Для повышения устойчивости массива предложено тампонировать налегающие породы. С целью выявления геологических условий и механических свойств налегающих пород, а также прогнозирования высоты развития водопроводящей трещины в область очистного забоя с дневной поверхности пробурена скважина глубиной 634 м. В результате бурения получены керны диаметром 91 мм. Забой пробуренной скважины приходится на подошву угольного пласта № 3.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ

На рис. 1 представлено строение массива налегающих пород.

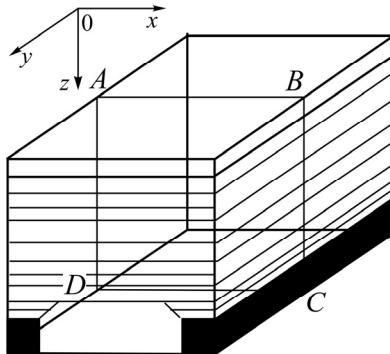


Рис. 1. Схема строения налегающих над выработкой: $ABCD$ — расчетное сечение

Рассматриваемая модель строения налегающих пород состоит из n слоев мощностью h_i , объемным весом γ_i , модулем упругости E_i , коэффициентом Пуассона μ_i и равномерной нагрузкой $(q_{n+1})_1$, перпендикулярной слоям. При обрушении нижней части толщи пород она начинает воспринимать со стороны всех вышележащих слоев равномерно распределенную нагрузку, которая может быть рассчитана следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \geq \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i. \quad (1)$$

Сдвигание породных слоев относительно друг друга сопровождается возникновением значительных напряжений сдвига и растяжения. При превышении напряжением определенного значения, которое могут выдержать слои в условиях, когда жесткость и прочность верхнего и нижнего пласта существенно отличаются, происходит нескоординированная деформация. В случае отсутствия передачи нагрузки от верхней толщи пород нижним слоям создаются условия формирования разделительной трещины между ними:

$$(q_n)_1 > (q_{n+1})_1. \quad (2)$$

$$E_{n+1} h_{n+1}^2 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i > \gamma_{n+1} \sum_{i=1}^n E_i h_i^3. \quad (3)$$

Когда слой выдерживает нагрузку и выполняется условие (3), его можно обозначить как толща твердой породы, вокруг которой может образоваться трещина. Если прочностные условия будут удовлетворены, то верхний слой определится как опорный и ниже него будет формироваться трещина.

Если расчеты удовлетворяют условию $(q_n)_1 > (q_{n+1})_1$, то $n+1$ слой не будет находиться под влиянием n -го слоя. Следовательно, при расчете толщ пород выше слоя $n+1$ он должен быть пересчитан как первый слой.

Литологический состав и данные для выявления разделительных трещин в условиях очистного забоя 8006 показаны в табл. 1. Если результат расчета превышает 0, то данный породный слой имеет высокую предрасположенность к образованию трещины.

Из табл. 1 видно, что механическая структура литологических толщ 2, 10, 13 и 17 предрасположена к разделению с нижележащими слоями.

ТАБЛИЦА 1. Результаты выявления разделительных трещин для условий очистного забоя 8006

Номер	Состав слоя	Глубина залегания, м	Мощность, м	Плотность, кН/м ³	Модуль упругости, ГПа	Результат расчета	Вероятность образования трещины
29	Почва	32.25	32.25	25.0	2.65	– 29.68	—
28	Среднезернистый песчаник	66.64	34.39	25.6	8.63	– 257.66	—
27	Мадстоун	96.74	30.10	26.3	6.52	– 197.43	—
26	Промежуточный слой песка	133.24	36.50	24.4	8.15	– 14.83	—
25	Мадстун	202.75	69.51	26.3	1.52	– 320.45	—
24	Среднезернистый песчаник	217.80	15.05	25.6	12.13	– 57.03	—
23	Мадстоун	251.60	33.80	26.3	6.52	– 274.53	—
22	Алеврит	267.38	15.78	25.6	11.24	– 80.46	—
21	Мадстоун	283.82	16.44	26.3	6.52	– 67.81	—
20	Крупнозернистый песчаник	300.48	16.66	24.5	8.18	– 189.63	—
19	Песчаный мадстоун	327.83	27.35	25.3	6.52	– 372.56	—
18	Среднезернистый песчаник	331.68	3.85	25.6	8.63	– 94.66	—
17	Крупнозернистый песчаник	352.85	21.17	24.5	8.18	339.84	Да
16	Песчаный мадстоун	358.50	5.65	25.3	6.52	– 93.51	—
15	Алеврит	362.50	4.00	25.6	11.24	– 73.66	—
14	Песчаный мадстоун	371.12	8.62	25.3	6.52	– 137.79	—
13	Алеврит	384.07	12.95	25.6	11.24	40.10	Да
12	Мелкозернистый песчаник	389.42	5.35	25.4	10.91	– 57.28	—
11	Песчаный мадстоун	418.77	29.35	25.3	1.24	– 233.69	—
10	Среднезернистый песчаник	432.97	14.20	25.6	12.85	41.84	Да
9	Песчаный мадстоун	443.77	10.80	25.3	6.52	– 57.30	—
8	Среднезернистый песчаник	473.81	29.04	25.6	2.26	– 10.02	—
7	Промежуточный слой песка и гряды	517.90	41.09	24.4	1.15	– 37.15	—
6	Среднезернистый песчаник	531.00	13.10	25.6	3.65	– 176.20	—
5	Песчаный мадстоун	536.76	5.76	25.3	6.52	– 101.32	—
4	Среднезернистый песчаник	558.96	22.20	25.6	2.63	– 290.03	—
3	Песчаный мадстоун	563.26	4.30	25.3	6.52	– 105.37	—
2	Алеврит	583.66	20.40	25.6	11.24	366.00	Да
1	Песчаный мадстоун	614.45	30.79	25.3	1.52	—	—
	Уголь	619.95	5.50	14.0	3.46	—	—

Примечание: Слои 1–2 — формация Шаньси; 3–7 — нижняя формация Шихэцзы; 8–29 — верхняя формация Шихэцзы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРЕЩИН

Морфология налегающих пород. Моделирование выполнено на примере очистного забоя 8006 шахты Wuyang при отработке пологопадающего угольного пласта № 3 на глубине 630 м. Для изучения деформирования налегающих пород построена крупномасштабная модель размерами 5000 × 300 × 3000 мм. Нижняя, правая и левая границы модели жестко зафиксированы, передняя и задняя границы представлены высокопрочным прозрачным акриловым стеклом. Мониторинг сдвижений налегающих пород и определение раскрытия трещин в процессе отработки пласта выполнены с помощью фотограмметрии и бесконтактного анализа деформаций. Для измерения напряженно-деформированного состояния налегающих пород использованы датчики давления и беспроводные индикаторы статической деформации. Расположение датчиков в модели представлено на рис. 2.

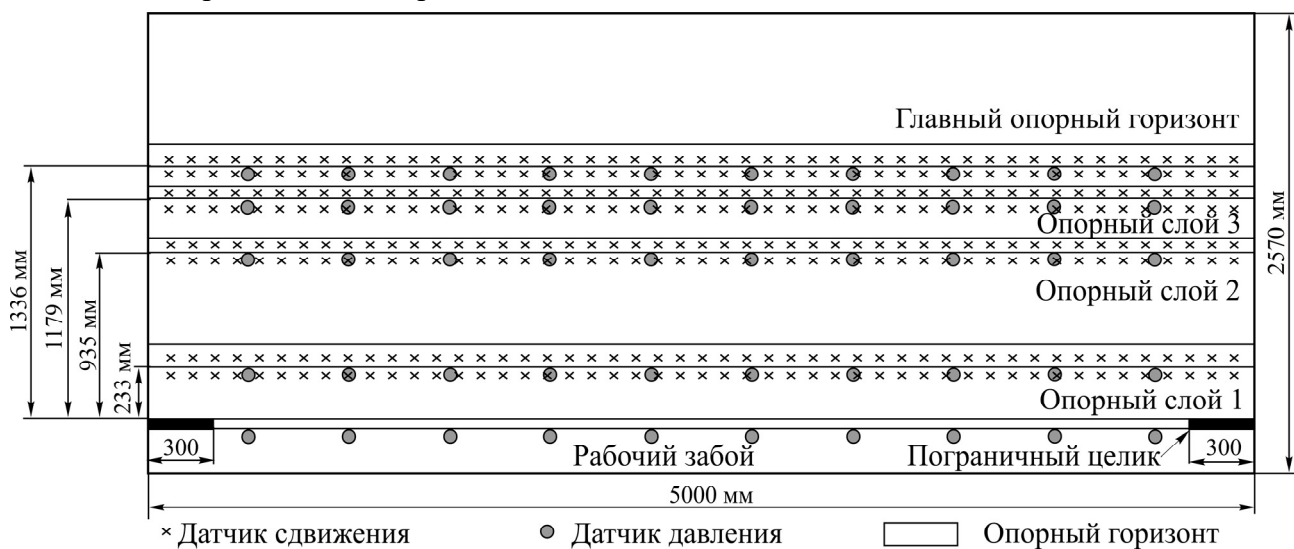


Рис. 2. Схема физической модели с учетом геометрического масштаба подобия

Для минимизации влияния границ на поведение модели по ее краям установлены угольные целики длиной 30 см. Отработка пласта мощностью 2.75 см, что эквивалентно фактической высоте забоя 5.5 м, осуществлялась слева направо, шаг подвигания 5 см соответствовал фактическому — 10 м. Временной интервал между соседними подвиганиями установлен на значении 30 мин. После каждого подвигания в условиях устойчивого состояния массива сделаны фотографии и выполнено измерение параметров разделительной трещины.

Как показано на рис. 3, при достижении очистным забоем отметки 140 образовалась разделительная граница серповидной формы между слоем алевролита 1 и толщей песчаного аргиллита. Вертикальное расстояние между разделительной трещиной 1 и угольным пластом составило 46.74 м, раскрытие разделительной трещины — 2.34 м. При достижении отметки подвигания 160 м раскрытие увеличилось до 2.44 м.

На отметке подвигания 180 м достигнут предельный пролет отработки. Под действием давления налегающих пород произошло закрытие разделительной трещины 1. В условиях общего изгиба и осадки породных формаций, удерживаемых слоем 1, между толщами мелкозернистого песчаника и нижележащим песчаным аргиллитом образовалась разделительная трещина 2. Вертикальное расстояние от угольного пласта до разделительной трещины 2 составило 186.98 м, раскрытие — 0.67 м. В процессе подвигания забоя трещина развивалась вертикально и горизонтально в направлении подвигания.

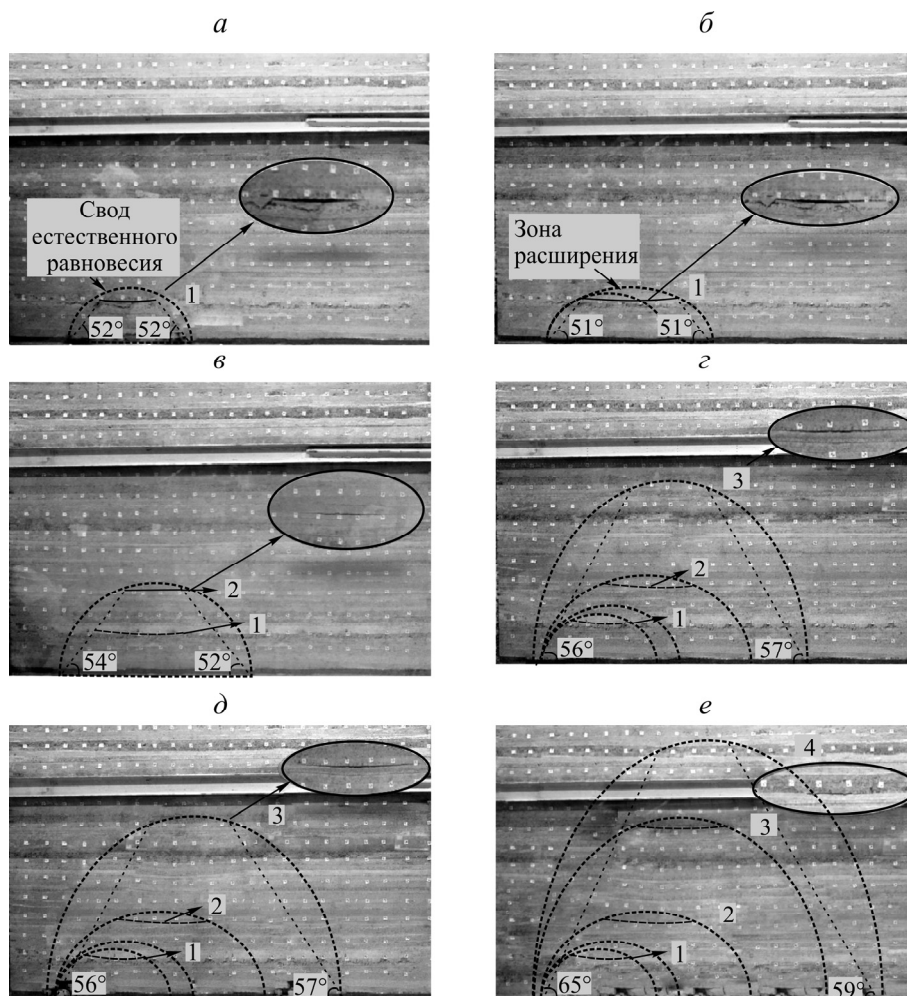


Рис. 3. Характер изменения сдвижения массива налегающих пород при увеличении расстояния подвигания очистного забоя: 140 м (а); 160 (б); 180 (в); 240 (г); 280 (д); 340 м (е); 1, 2, 3, 4 — разделительные трещины

На отметке подвигания 240 м между слоями алевроита и залегающим ниже мелкозернистым песчаником образовалась разделительная трещина 3. Вертикальное расстояние от угольного пласта до разделительной трещины 3 составило 235.88 м. На отметке подвигания 280 м достигнуто максимальное раскрытие разделительной трещины 3 — 1.32 м. На отметке подвигания 340 м на расстоянии от угольного пласта 261.6 м образовалась разделительная трещина 4 с максимальным раскрытием 1.3 м.

В ходе эксперимента выявлено, что развитие деформаций массива налегающих пород происходит в восходящем направлении в форме лестницы. Каждая породная формация состоит из мощного и прочного опорного слоя в нижней части и маломощной слабой толщи в верхней. Прочный слой в нижней части выполняет основную несущую функцию формации. Разделение развивается внизу формации. Основная причина разделения — разница между значениями осадки в рамках одной формации. Каждая разделительная трещина испытывает следующий цикл: “зарождение – расширение – устойчивое развитие – затухание – закрытие”. В процессе подвигания забоя динамическое развитие разделительной трещины имеет пошаговый вид, т. е. закрытие нижней трещины сопровождается открытием верхней. Разделительная трещина развивается в пределах свода равновесного давления.

Изменение геометрических параметров разделительных трещин. Трехмерный мониторинг сдвижений налегающих пород в модели выполнен с помощью фотограмметрии и программного обеспечения “Photoinfor”. Линии измерения сдвижений установлены по опорным слоям и горизонтам ниже разделительных трещин соответственно (рис. 4). Отклонение опорного слоя наблюдалось по сплошной линии. Отклонение нижнего слоя — по пунктирной. Отклонение разделительной трещины рассчитывалось по разнице отклонения опорного и нижнего слоев.

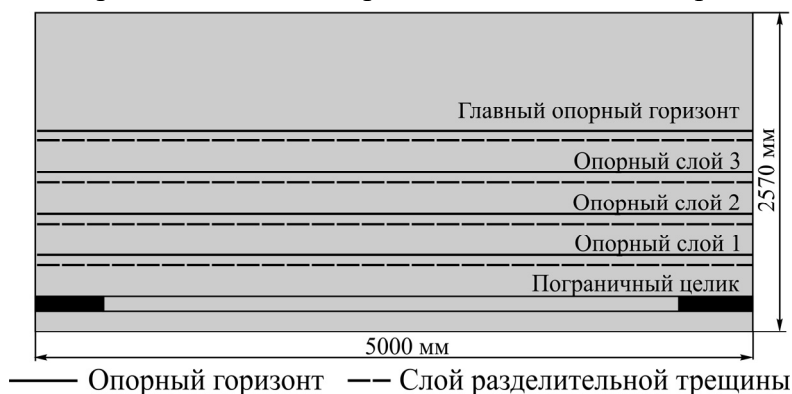


Рис. 4. Линии для мониторинга сдвижений горных пород на различных глубинах

На рис. 5 представлена карта развития сдвижений налегающих пород в ходе подвигания забоя.

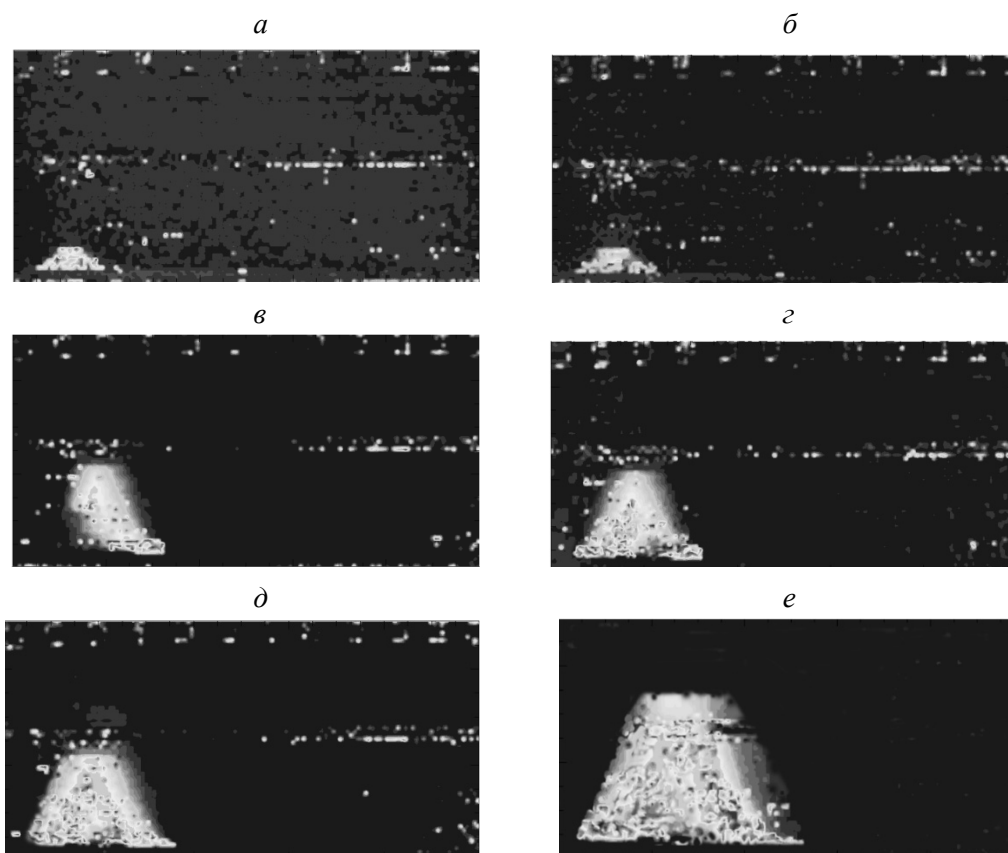


Рис. 5. Развитие зоны обрушения пород над забоем в процессе его подвигания, м: 140 (а), 160 (б), 180 (в), 220 (г), 280 (д), 340 (е)

Как видно из рис. 5, в процессе подвигания забоя происходит увеличение высоты и площади зоны осадки пород над забоем. Область осадки налегающих над выработкой пород имеет вид равнобедренной трапеции. На карте вертикальных сдвижений образуется явная поверхность раздела между осажженной и неосажженной областями. Наличие такого раздела демонстрирует очевидную деформацию, где появляется разделительная трещина. Разница в значениях сдвига по измерительной линии использована для расчета раскрытия разделительной трещины на каждом этапе подвигания. На рис. 6 показано распределение раскрытия разделительных трещин в направлении подвигания забоя.

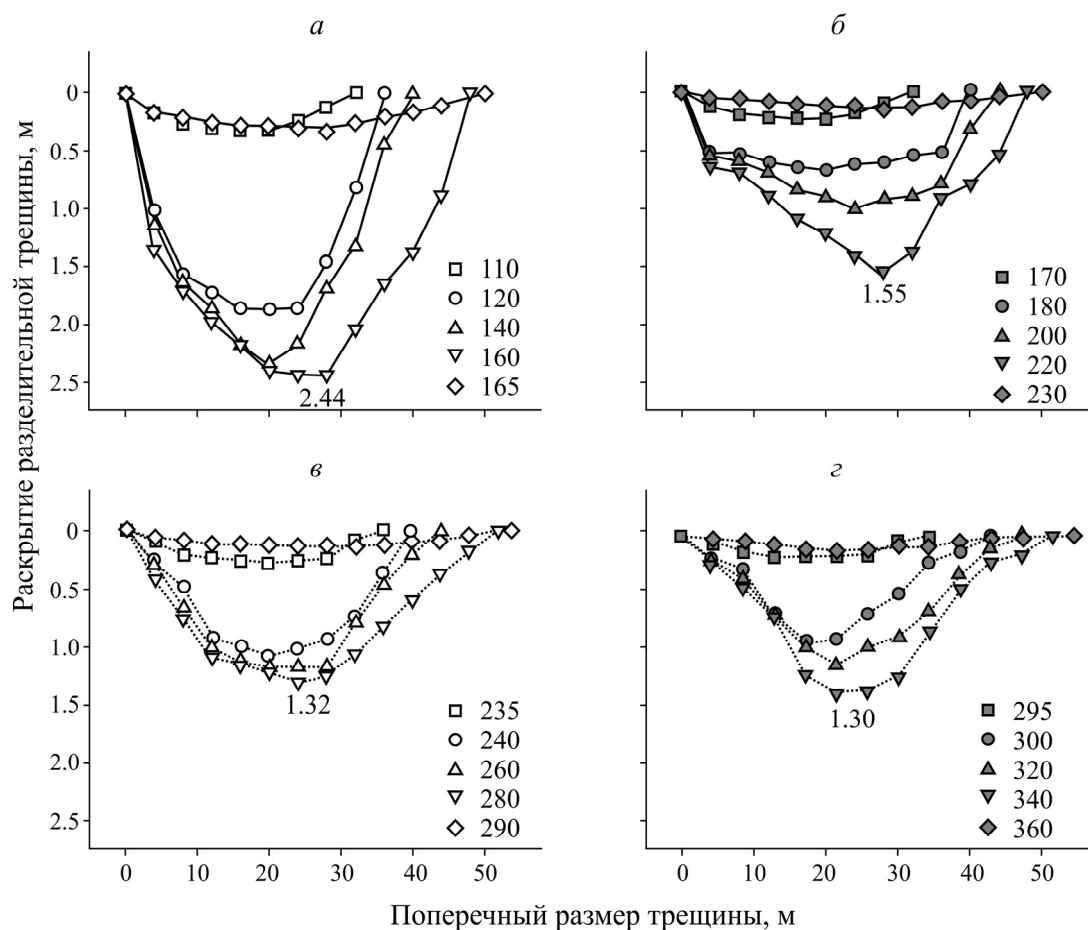


Рис. 6. Соотношение раскрытия разделительной трещины 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и ее поперечного размера на различных отметках подвигания

На отметке подвигания 160 м поперечный размер разделительной трещины 1 составил 45 м, а максимальное раскрытие ее достигло значения 2.44 м. С морфологической точки зрения разделительная трещина образует “серповидную форму”. При этом максимальное раскрытие наблюдается в середине трещины. В процессе подвигания забоя происходит увеличение как самой разделительной трещины в горизонтальном направлении, так и ее раскрытия. Когда длина свисающего опорного слоя превышает пороговое значение, происходит его разрушение и трещина закрывается.

На рис. 7 представлены графики изменения максимального раскрытия разделительных трещин 1 – 4 относительно расстояния подвигания забоя.

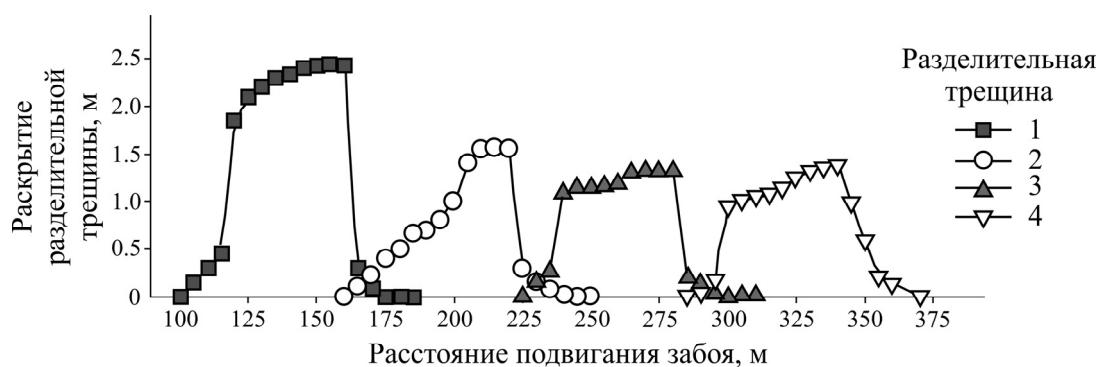


Рис. 7. Зависимость между максимальным раскрытием трещины и подвиганием забоя

Цикл развития трещины состоит из пяти стадий: “зарождение – расширение – устойчивое развитие – затухание – закрытие”. По направлению снизу вверх максимальные значения раскрытия разделительных трещин 1–4 составили 2.44, 1.55, 1.32 и 1.30 м соответственно. На основании данных значений прослеживается убывающая тенденция, которая объясняется тем, что при росте мощности разрушения опорного слоя увеличивается разгрузочная высота налегающих пород. При этом общая толщина породного слоя увеличивается, что приводит к меньшим значениям раскрытия трещин, расположенных ближе к дневной поверхности.

ВЫВОДЫ

На примере очистного забоя 8006 угольной шахты выполнен расчет напряжений на поверхностях раздела породных слоев по принципу составной балки с целью прогнозирования местоположения разделительной трещины. С помощью сети оптоволоконных датчиков проведены наблюдения за состоянием слоистых толщ пород, склонных к сдвигам. Результаты исследований с достаточной точностью отражают параметры деформаций налегающей толщи пород и могут быть положены в основу разработки рекомендаций по их тампонажу на угольной шахте.

Получено выражение для установления месторасположения разделительной трещины при подвигании очистного забоя в массиве налегающих пород для геомеханических условий очистного забоя 8006. Установлено, что разделительная трещина развивается между толщей крупнозернистого песчаника и нижележащим слоем песчаного аргиллита на вертикальном расстоянии от угольного пласта 265 м.

В процессе подвигания забоя в налегающих над выработкой породах образуется свод естественного равновесия, в пределах которого за счет разделительной трещины происходит развитие зоны обрушения пород над очистным забоем в форме трапеции. Размеры разделительной трещины увеличиваются как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Развитие верхней разделительной трещины сопровождается уменьшением нижней до полного закрытия. Диапазон углов основания трапеции, формирующей область разделительной трещины, составляет 55–65°.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longhui Guo, Ye Cheng, and Shilong Peng. Study on fracture evolution and subsidence fractal characteristics of overlying strata in thin bedrock mining with thick undispersed beds, Safety in Coal Mines, 2020, Vol. 51, No. 9. — P. 59–64.

2. **Zhenli Fan.** Study on the characteristics of slurry migration channel and solute diffusion in separated layer filling mining, *Coal Sci. Technol.*, 2017, Vol. 45, No. 7. — P. 172–179.
3. **Wei Qiao, Shilong Zhao, Liangang Li, Shengfeng Gan, Chuanwen Jiang, Mengnan Liu, Lei Zhang, and Yulu Duan.** Study on evolution characteristics of upper strata and precursory information of water gushing (outburst) in mining overburden, *Coal Sci. and Technol.*, 2021, Vol. 49, No. 2. — P. 194–205.
4. **Wei Qiao, Zhiwen Wang, Wenping Li, Yuguang Lv, Liangang Li, Yang Huang, Jianghui He, Xiaoqin Li, Shilong Zhao, and Mengnan Liu.** Formation mechanism, disaster causing mechanism and prevention technology of water damage in coal mine roof, *J. China Coal Soc.*, 2021, Vol. 46, No. 2. — P. 507–522.
5. **Dayang Xuan and Binglong Wang, and Jialin Xu.** A shared borehole approach for coal-bed methane drainage and ground stabilization with grouting, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2016, Vol. 86. — P. 235–244.
6. **Renlun Wu, Jilin Wang, Zhilong Zhe, and Hui Cheng.** Influence of coal seam mining height on the “three zones” of gas relief movement in mining overlying rock, *J. Min. & Safety Eng.*, 2017, Vol. 34, No. 06. — P. 1223–1231.
7. **Minggao Qian, Xiexing Miu, and Jialin Xu.** Research on key layer theory in rock control, *J. China Coal Society*, 1996, Vol. 3. — P. 2–7.
8. **Jialin Xu, Minggao Qian, and Hongwei Jin.** Study on the evolution law of strata movement and separation and its application, *Chinese J. Geotechnical Eng.*, 2004, Vol. 5. — P. 632–636.
9. **Palchik V.** Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction, *Environmental Geology*, 2005, Vol. 48, No. 1. — P. 68–80.
10. **Jiang-Hui He, Wen-ping Li, Yu Liu, Zhi Yang, Shi Liang Liu, and Luan-Fei Li.** An improved method for determining the position of overlying separated strata in mining, *Eng. Failure Analysis*, 2018, Vol. 83. — P. 17–29.
11. **Suhua Wang, Chaoliang Song, and Yong Liu.** Experimental study on dynamic development of overlying strata, *J. Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, Vol. 51, No. 4. — P. 663–667.
12. **Xiangdong Zhang, Xueli Fan, and Deshen Zhao.** The space-time process of overburden movement, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2002, Vol. 1. — P. 56–59.
13. **Xin Zhang, Wei Qiao, and Lijian Lei.** Formation mechanism of overburden separated layer in fully mechanized caving mining, *J. China Coal Society*, 2016, Vol. 41, No. S2. — P. 342–349.
14. **Chunde Pu, Bin Shi, and Guangqing Wei.** BOTDA distributed measurement and separation analysis of mining overburden deformation, *J. Min. & Safety Eng.*, 2015, Vol. 32, No. 3. — P. 376–381.
15. **Hailiang Tan and Qiming Li.** Application of optical fiber sensing technology in height detection of two overburden zones, *Coal Geology of China*, 2019, Vol. 31, No. 5. — P. 60–65.
16. **Chonggang Wang.** Analysis of grouting effect in high and thick hard rock stratum separation zone, *Shandong Coal Sci. Technol.*, 2018, Vol. 210, No. 2. — P. 53–55.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 15/II 2024

Принята к публикации 14/III 2024