

УДК 539.42, 531.001

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ПЛОТИКА НА ДЕФОРМАЦИЮ И РАЗРУШЕНИЕ
НАЛЕГАЮЩЕГО ГЛИНЯНОГО СЛОЯ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ**

Г. Ву¹, Х. Бай², Л. Ву³, Ш. Хи⁴

*Китайский университет горного дела,
E-mail: ¹xiaowugm@163.com, ²hbbaiteacher@sina.com,
³tb17220023b0@cumt.edu.cn, ⁴tb17220014b0@cumt.edu.cn,
221116, г. Сюйчжоу, Цзянсу, Китай*

Для анализа влияния мощности плотика на деформацию и разрушение налегающего глиняного слоя проведен лабораторный эксперимент с помощью имитационной модели. Выбраны два показателя разрушения глиняного слоя: толщина слоя, где образуются трещины, и плотность трещин. Показано, что толщина слоя формирования трещин увеличивается по мере уменьшения мощности плотика. Выявлены две стадии изменения размеров слоя разрушения: при мощности плотика свыше 30 м (мощность угольного пласта 6 м) толщина слоя трещинообразования меняется незначительно, при мощности плотика менее 30 м толщина слоя разрушения увеличивается. Основное влияние мощности плотика на деформацию и разрушение налегающего глиняного слоя заключается в увеличении числа трещин сдвига и растяжения. При мощности плотика 70 м плотность трещин сдвига и растяжения составляет 0.04 тр/м, в то время как при мощности 20 м плотность трещин возрастает до 0.14 тр/м.

Налегающий глиняный слой, имитационное моделирование, плотность трещин, плотик малой мощности

DOI: 10.15372/FTPRPI20200403

Экологические проблемы, возникающие при добыче угля в Китае, например перераспределение подземных вод, разрушение дневной поверхности, становятся крайне существенными ввиду повышения интенсивности добычи. Данные проблемы заметнее всего проявляются в областях среднего запада, где подземные водные ресурсы широко распределены в покрывающих породах кайнозойской эры. Повреждение налегающих пород при разработке угольных пластов неизбежно приводит к перемещению подземных вод [1 – 5]. Для борьбы с указанным явлением предлагаются методы: “зеленая угледобыча” [6 – 8], “сосуществование угля и воды” [9 – 11].

При добыче угля под слоем коренной породы (плотиком) малой мощности вода, протекающая через зону трещин, может проникать через плотик. В этом случае глиняный слой в налегающих породах становится важным водоостанавливающим фактором и играет существенную

Работа выполнена при поддержке Китайского национального фонда естественных наук (проекты № 41977238, 51804339) и Китайского фонда поддержки исследований на уровне докторантуры и выше (проекты № 2019T120715, 2018M640760).

роль в предотвращении попадания воды в рабочий забой из пористых и фреатических горизонтов. При этом наличие трещин и степень разрушения глиняного слоя значительно влияют на его водоостанавливающую эффективность [12 – 15].

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов механического разрушения налегающих пород и анализу степени их водопроницаемости. В [16] выявлено, что при разработке угольного пласта в условиях малой мощности плотика трудно сформировать устойчивую структуру в старой кровле, если она подверглась разрушению и находится под действием горного давления. Разработана механическая модель конструкции прямой кровли для полностью механизированного обрушения забоя в маломощном плотике и установлены условия, при которых в арке устанавливается динамическое равновесие при подвигании забоя [17, 18]. В [19] предложен новый аналитический подход для описания разрушения массива в процессе добычи угля. В [20] исследовано влияние глубины залегания на неплотный водный горизонт четвертичной эры и отмечено, что горные работы, проводимые в пластах с глубиной залегания более 190 м, не оказывают существенного влияния на неплотный водный горизонт четвертичной эры. Обнаружено, что естественные и наведенные поля напряжений и гидростатическое давление подземных вод являются факторами, которые могут привести к естественному гидравлическому разрушению. Последнее влечет прорыв воды в шахту [21]. В [22, 23] полагается, что горная технология по защите от водных горизонтов может успешно применяться с помощью изменения параметров добычи. В [24] исследовано влияние мощности угольного пласта, глубины залегания и других параметров на характеристики развития трещин в налегающей породе.

Параметры деформирования и разрушения налегающей породы существенно влияют на водоостанавливающее свойство пород. В данной работе в качестве управляющего фактора выбрана мощность плотика. Характеристики деформирования и разрушения налегающего слоя породы исследуются экспериментально в рамках имитационной модели.

Цель настоящей работы — анализ параметров разработки угольного пласта, обеспечивающих устойчивость слоя налегающей породы и его защитные свойства от скрытых подземных водных ресурсов в геологических районах с малой мощностью плотика.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПЛОТИКА

В настоящее время не существует четкого стандарта определения плотика малой мощности, поэтому многие исследователи используют различные определения исходя из решаемых задач. Например, плотик малой мощности определяются в соответствии с размерами зон, обеспечивающих водоостанавливающий эффект [25]. Некоторые исследователи определяют плотик малой мощности на основе наличия коренного пласта с точки зрения контроля за горным давлением [18]. В данной работе вслед за [25] будем определять плотик малой мощности с точки зрения его водозащитной функции. Если мощность плотика H_b меньше толщины зоны осадки H_c , то он будет называться плотиком сверхмалой мощности, если мощность плотика H_b выше толщины зоны осадки H_c , но меньше размеров зоны трещинообразования, через которую протекает вода $H_c + H_f$, то будем называть его плотиком малой мощности (рис. 1), наконец, если мощность плотика H_b выше толщины зоны трещин $H_c + H_f$, то плотик будет иметь нормальную мощность. В данной работе плотики сверхмалой и малой мощности объединены и будут обозначаться как плотики малой мощности.

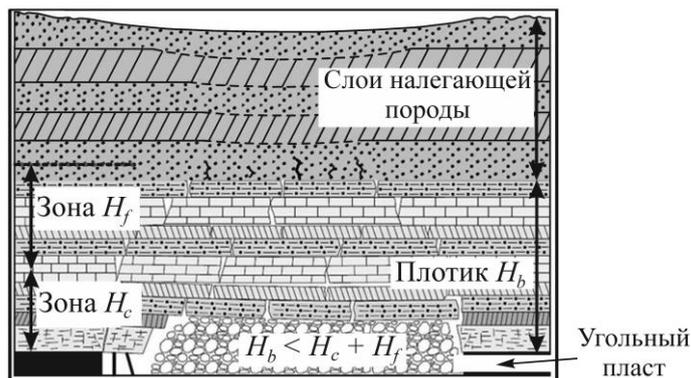


Рис. 1. Пример плотика малой мощности

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Характер деформирования и разрушения слоя налегающей породы при разработке угольного пласта в условиях плотика малой мощности исследовался с помощью экспериментальной установки, представляющей собой имитационную модель. Мощность угольного пласта 6 м, тип кровли — чередующиеся пласты относительно твердых и мягких пород, мощность налегающих пород 180 м, мощность плотика варьирует в пределах 70, 50, 30 и 20 м. Указанные параметры сведены в табл. 1. В дальнейшем проведено моделирование и сравнение полученных результатов для четырех наборов значений параметров задачи, указанных в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Проведение эксперимента с помощью имитационной модели, м

| Эксперимент | Мощность | | |
|-------------|------------------|------------------|---------|
| | угольного пласта | налегающих пород | плотика |
| 1 | 6 | 180 | 70 |
| 2 | | | 50 |
| 3 | | | 30 |
| 4 | | | 20 |

Размер имитационной экспериментальной установки составляет $1500 \times 200 \times 1500$ мм (длина/ширина/высота) (рис. 2). Исходя из размеров установки, определены следующие коэффициенты: подобия геометрических параметров (200), подобия плотности породы (1.5), подобия плотности грунта (1.0), подобия напряжений в коренной породе (300) и подобия напряжений в налегающей породе (200).



Рис. 2. Установка для имитационного моделирования

В качестве параметров, характеризующих процесс деформирования и разрушения налегающих пород, рассмотрим толщину слоя, где формируются трещины, и плотность трещин. Толщина слоя трещинообразования в глиняном слое определяется как $Fo_{st} = Fh_{st} - O_t$ (Fh_{st} — толщина слоя развития трещин в плотике и покрывающей породе; O_t — мощность плотика). Плотность трещин определяется как плотность развития трещин в покрывающей породе в области разрушения. Она рассчитывается как количество трещин на единицу длины $C_d = (n - 1) / d_c$ (n — количество трещин преимущественно ортогонального направления вдоль горизонтального профиля, d_c — длина профиля).

На рис. 3 показан пример расчета параметра плотности трещин. Видно, что в образце сформировано пять трещин сдвига и одна растяжения преимущественно в вертикальном направлении относительно горизонтального профиля. Длина профиля 62.9 см, плотность трещин сдвига/растяжения в данном примере — $C_d = (6 - 1) / 0.629 = 7.95$ тр/м.

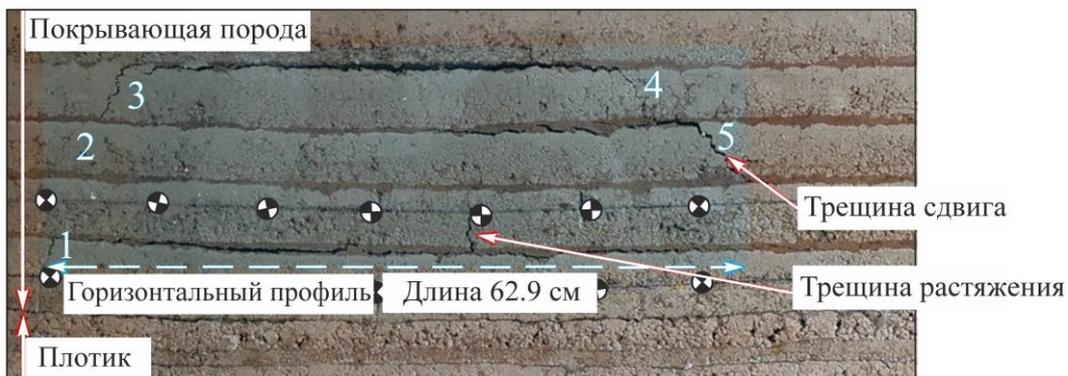


Рис. 3. Исследуемый параметр (плотность трещин C_d): 1 – 5 — трещины сдвига

Рассмотрим вопрос об имитационной модели коренной породы (плотика). Согласно условиям эксперимента принято, что плотик угольного пласта состоит из чередующихся пластов твердых и мягких пород. В соответствии с механическим индексом имитационных материалов [26], для моделирования мягких пород в качестве скелета структуры выбраны гипс, известняк, песок и другие материалы с меньшим механическим индексом (табл. 2). Число пропорциональности указанных материалов достигает 773. Для моделирования твердых пород использованы материалы с числом пропорциональности до 455.

Далее опишем имитацию налегающего глиняного слоя. Связный грунт может выдерживать большую пластическую деформацию и менять свою структуру, что является существенным фактором, который можно использовать в качестве водупора [27, 28]. Согласно [26, 29], материалы, предрасположенные к пластической деформации (вазелин, парафин, нефть и резина), могут выступать в качестве связующего элемента для имитирующих материалов, чтобы придать им пластические свойства. В [30, 31] для имитации глины успешно использовался в качестве скелета бентонит и песок, в качестве связующего элемента — силиконовое масло, машинное масло, силикат натрия и вазелин. Отмечено, что силиконовое масло — наилучший негидрофильный связующий элемент с низкой прочностью, вазелин — наилучший связующий элемент для придания пластичности. В [32 – 34] применялся глицерин, парафин, воск и графит в качестве связующих элементов для создания имитации горной породы с требуемыми характеристиками пластичности.

ТАБЛИЦА 2. Параметры материалов, имитирующих породу

| Число пропорциональности | Поглощение воды | Плотность, кг/м ³ | Предел прочности на сжатие, кПа | Предел прочности на растяжение, кПа |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 337 | 1/7 | 1500 | 283 | 56 |
| 355 | 1/7 | | 202 | 36 |
| 373 | 1/7 | | 119 | 17 |
| 437 | 1/9 | | 222 | 40 |
| 455 | 1/9 | | 158 | 27 |
| 473 | 1/9 | | 90 | 14 |
| 537 | 1/9 | | 197 | 30 |
| 555 | 1/9 | | 141 | 22 |
| 573 | 1/9 | | 86 | 12 |
| 637 | 1/9 | | 164 | 22 |
| 655 | 1/9 | | 121 | 16 |
| 673 | 1/9 | | 78 | 11 |
| 737 | 1/9 | | 135 | 18 |
| 755 | 1/9 | | 103 | 14 |
| 773 | 1/9 | | 70 | 9 |

Примечание. Проверка образцов осуществлялась после трехдневной сушки. Применялся вторичный строительный гипс

В настоящей работе вслед за [30, 31], при создании материала, имитирующего глину, в качестве скелета выбраны бентонит и песок, в качестве связующих элементов — вазелин и силиконовое масло. Для данных материалов определены их механические характеристики и числа пропорциональности (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Прочность материалов, имитирующих глину, с разным числом пропорциональности

| Число пропорциональности | Масса, г | Плотность в сухом состоянии, г/см ³ | Плотность, г/см ³ | Предел прочности на сжатие, кПа |
|--------------------------|----------|--|------------------------------|---------------------------------|
| 443 | 180.38 | 1.70 | 1.878 | 1.58 |
| 543 | 188.37 | | 1.961 | 1.53 |
| 643 | 186.89 | | 1.946 | 2.56 |
| 553 | 181.00 | | 1.884 | 1.18 |
| 563 | 180.82 | | 1.882 | 1.34 |

Изменение прочности и числа пропорциональности образцов материала, имитирующего глину, в зависимости от соотношения скелета и связующего, показано на рис. 4.

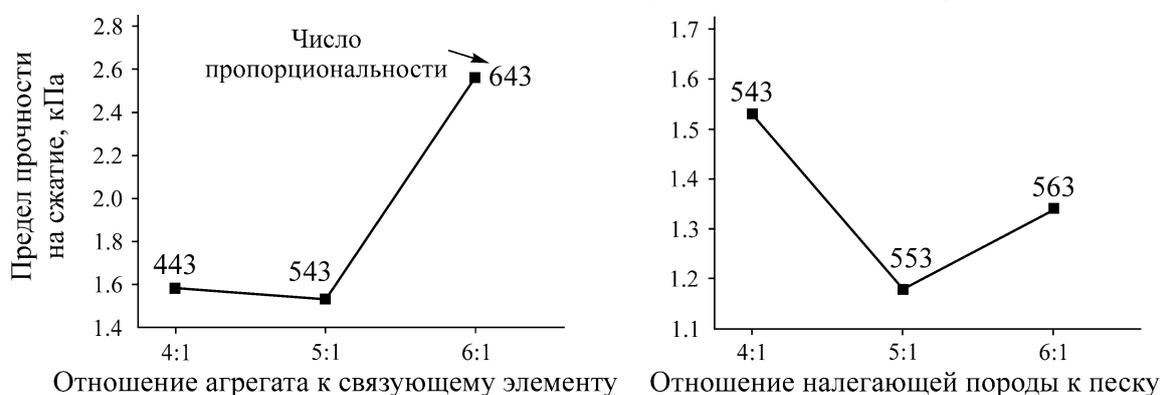


Рис. 4. Влияние различных пропорций на прочность материалов, имитирующих глину

Граничные условия имитационной модели представлены на рис. 2. Дно установки — жесткое шероховатое, полностью ограничивает нормальные и касательные смещения. Свободная поверхность имитирует дневную поверхность массива, она свободна от напряжений. Боковые границы — гладкие жесткие стенки, они ограничивают нормальные смещения и обеспечивают отсутствие касательных напряжений. Для обеспечения условий гладкости выполнено следующее: перед заполнением слоев модели боковые стенки установки смазаны маслом; примыкающая к стенкам часть имитирующего материала срезалась для его отделения от стенок установки.

В разработанной установке моделируются все слои породы от угольного пласта до дневной поверхности, поэтому нет необходимости дополнительно нагружать модель на верхней границе. Налгающая порода деформируется и разрушается под действием собственного веса по мере разработки угольного пласта и подвигания забоя, что является нагружающим фактором модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены эксперименты для всех наборов параметров из табл. 1. На рис. 6 показаны форма и толщина слоя разрушения налегающих глиняных слоев для эксперимента 4.

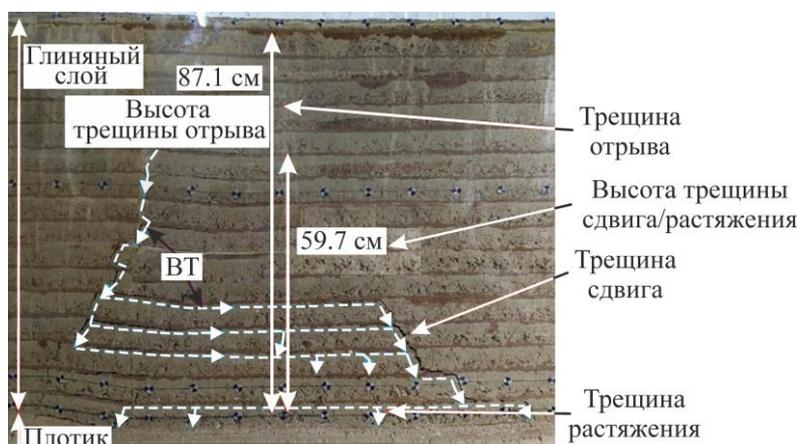


Рис. 6. Форма и толщина глиняного слоя, подвергаемого разрушению в эксперименте 4 (мощность плотика 20 м): ВТ — взаимопроницаемые трещины

После обработки полученных результатов по мощности слоя образования трещин в глиняных породах в зависимости от мощности плотика, с учетом выбранного коэффициента геометрического подобия, построены зависимости (рис. 7).

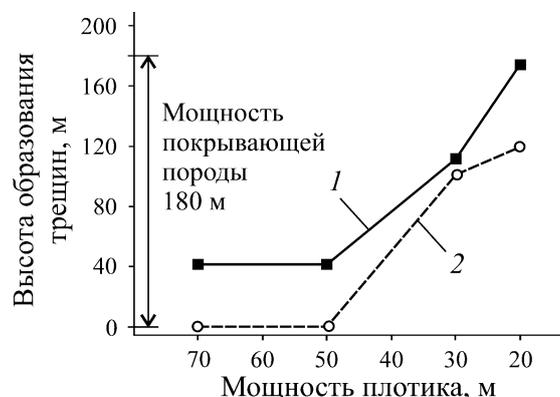


Рис. 7. Зависимость высоты образования трещин от мощности плотика: 1 — высота взаимопроницаемых трещин сдвига/растяжения; 2 — мощность покрывающей породы

Толщина слоя образования трещин увеличивается при уменьшении мощности плотика. При этом увеличение толщины этого слоя можно разделить на две стадии. Существует критическая мощность плотика, при которой развитие трещин в глиняном слое меняется качественно. На первой стадии, когда мощность плотика более 30 м (мощность угольного пласта 6 м), трещины отрыва и взаимопроникающие трещины сдвига/растяжения в покрывающей породе развиваются незначительно. Этот результат слабо зависит от изменения мощности плотика. На второй стадии, когда мощность плотика менее 30 м, трещины отрыва и взаимопроникающие трещины сдвига/растяжения в покрывающей породе развиваются весьма интенсивно. При уменьшении мощности плотика до 20 м трещины отрыва достигают свободной поверхности, а верхняя граница слоя трещин сдвига/растяжения достигает границы области покрывающей породы. Мощность слоя образования взаимопроникающих трещин сдвига/растяжения достигает 119.4 м, что составляет 66 % мощности всех слоев покрывающей породы.

Далее исследованы форма разрушения и плотность трещин в глиняном слое для всех наборов параметров из табл. 1. На рис. 8. показаны результаты эксперимента 3.

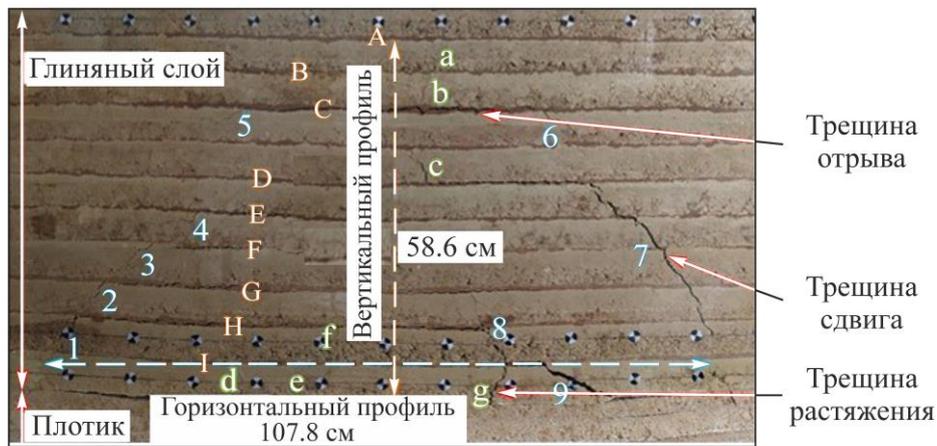


Рис. 8. Форма разрушения и плотность трещин в глиняном слое (мощность плотика 30 м): 1 – 9 — трещины сдвига; a – g — трещины растяжения; A – I — трещины отрыва

Рассчитанные в результате экспериментов плотности трещин с учетом выбранного коэффициента геометрического подобия представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Статистические данные плотности трещин сдвига/растяжения и отрыва

| Номер эксперимента | Мощность плотика, м | Длина горизонтального профиля, м | Преимущественная ориентация трещин | Количество трещин | Плотность трещин, тр/м |
|--|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------|
| Статистические данные плотности трещин сдвига/растяжения | | | | | |
| 1 | 70 | 125.8 | Вертикальная | 6 | 0.04 |
| 2 | 50 | 179.2 | | 8 | 0.04 |
| 3 | 30 | 215.6 | | 16 | 0.07 |
| 4 | 20 | 218.6 | | 32 | 0.14 |
| Статистические данные плотности трещин отрыва | | | | | |
| 1 | 70 | 44.6 | Горизонтальная | 3 | 0.04 |
| 2 | 50 | 46.2 | | 4 | 0.06 |
| 3 | 30 | 117.2 | | 9 | 0.07 |
| 4 | 20 | 179.8 | | 16 | 0.08 |

На основе приведенных данных построен график зависимости плотности трещин от мощности плотика (рис. 9). С уменьшением мощности плотика плотность трещин отрыва меняется не очень существенно, в то время как плотность трещин сдвига/растяжения меняется значительно. Основное следствие уменьшения мощности плотика на деформацию и разрушение налегающей породы заключается в увеличении количества трещин сдвига/растяжения, развивающихся преимущественно в вертикальном направлении. При этом существует критическое значение мощности плотика, которое составляет 30 м. Если мощность выше критического значения, то плотность трещин в налегающей породе сравнительно невысока. При мощности плотика менее 30 м увеличение плотности трещин происходит интенсивно.

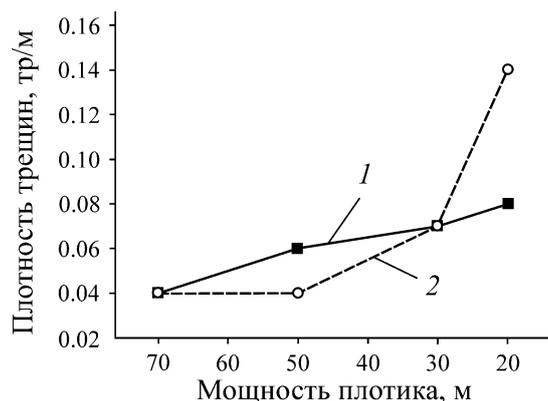


Рис. 9. Зависимость плотности трещин от мощности плотика: 1 — плотность трещин отрыва; 2 — плотность трещин сдвига/растяжения

ВЫВОДЫ

Толщина слоя, где формируются трещины, и плотность трещин не играют существенной роли в случае, когда мощность плотика более 30 м (при мощности угольного пласта 6 м). При мощности плотика менее 30 м толщина слоя трещинообразования и плотность трещин интенсивно растут.

При уменьшении мощности плотика плотность трещин отрыва изменяется незначительно, в то время как основной рост приходится на трещины сдвига/растяжения. При этом трещины сдвига/растяжения развиваются преимущественно в вертикальном направлении.

Существует критическое значение мощности плотика, которое составляет 30 м. Если мощность превышает критическое значение, то толщина слоя формирования трещин, а также их плотность меняются незначительно в процессе разработки угольного пласта. Если же мощность плотика менее 30 м, то в налегающей породе идет интенсивное трещинообразование с ростом толщины слоя, где образуются трещины, и плотности трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J. M., Li Q. S., Nan Q. A., Cao Z. G., and Zhang K. Study on the bionic coal and water comining and its technological system in the ecological fragile region of West China, J. of China Coal Soc., 2017, Vol. 42, No. 1. — P. 66–72.
2. Zhang M. S., Dong Y., Du R. J., and Xiao X. F. The strategy and influence of coal mining on the groundwater resources at the energy and chemical base in the north of Shanxi, Earth Sci. Frontiers, 2010, Vol. 17, No. 6. — P. 235–246.

3. **Yu H. T., Zhu S. Y., and Chen Y.** Comparative analysis of water inrush from the deep coal floor by mining above the confined aquifer, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 3. — P. 407–413.
4. **Bai H. B., Mao X. B., Yao B. H., and Tang J. H.** Research on simultaneous exploitation of coal and groundwater in LU'AN coalfield, *Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2009, Vol. 28, No. 2. — P. 395–402.
5. **Bai H. B., Ma D., and Chen Z. Q.** Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars, *Eng. Geol.*, 2013, No. 164. — P. 101–106.
6. **Qian M. G., Xu J. L., and Miao X. X.** Green technique in coal mining, *J. of China University of Min. and Tech.*, 2003, Vol. 32, No. 4. — P. 343–347.
7. **Qian M. G., Miao X. X., and Xu J. L.** Resources and environment harmonics (freen) mining and its technological system, *J. Min. and Safety Eng.*, 2006, Vol. 23, No. 1. — P. 1–5.
8. **Qian M. G.** On sustainable coal mining in China, *J. of China Coal Soc.*, 2010, Vol. 35, No. 4. — P. 529–534.
9. **Fan L. M., Wang S. M., and Ma X. D.** Typical example of new idea for water conservation and coal mining, *J. Min. Safety and Env. Protection*, 2009, Vol. 36, No. 1. — P. 61–65.
10. **Fan L. M., Ma X. D., and Ji R. J.** Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area, *J. of China Coal Soc.*, 2011, Vol. 40, No. 8. — P. 1711–1717.
11. **Fan L. M.** Scientific connotation of water-preserved mining, *J. of China Coal Soc.*, 2017, Vol. 42, No. 1. — P. 27–35.
12. **Palchik V.** Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining, *Env. Geol.*, 2003, No. 44. — P. 28–38.
13. **Xu Y. C.** Engineering characteristics of deep clay and its application in coal mining under building structure, railway and water body, *J. Coal Sci. and Tech.*, 2004, Vol. 32, No. 11. — P. 21–23.
14. **Zhang L. Z., Dong Q. H., Zhang X. C., Gao X. T., and Zhan K. Y.** Study on self-healing ability of mining cracks in remoulded cohesive soil in loose layer, *Energy Tech. and Manag.*, 2010, No. 1. — P. 57–60.
15. **Li W. P., Wang Q. Q., and Li X. Q.** Reconstruction of aquifuge: the engineering geological study of N₂ laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in Northwest China, *J. of China Coal Soc.*, 2017, Vol. 42, No. 1. — P. 88–96.
16. **Ding Lujun and Liu Yuhong.** Study on overlying strata motion rule of shortwall mining face of shallow seam with simulation experiment, *J. Min. Sci.*, 2019, No. 5. — P. 90–97.
17. **Du Feng and Bai Haibo.** Mechanism research of overlying strata activity with fully mechanized caving in thin bedrock with thick alluvium, *J. of China Coal Soc.*, 2012, Vol. 37, No. 7. — P. 1105–1110.
18. **Du Feng and Bai Haibo.** Mechanical analysis of immediate roof in fully mechanized top coal caving mining with thin bedrock, *J. of China Coal Soc.*, 2013, Vol. 38, No. 8. — P. 1331–1337.
19. **Mirenkov V. E.** Interaction between enclosing rocks and roof support during stoping, *J. Min. Sci.*, 2017, Vol. 53, No. 5. — P. 811–817.
20. **Jiao Yang, Bai Haibo, Zhang Boyang, Wei Xiaoqi, and Rong Huren.** Research on the effect of coal mining on the aquifer of Quaternary loose soils, *J. Min. and Safety Eng.*, 2012, Vol. 29, No. 2. — P. 239–244.
21. **Odintsev V. N. and Miletenko N. A.** Water inrush in mines as a consequence of spontaneous hydrofracture, *J. Min. Sci.*, 2015, Vol. 51, No. 3. — P. 423–434.
22. **Zhang Dongsheng, Fan Gangwei, Ma Liqiang, and Wang Xufeng.** Aquifer protection during longwall mining of shallow coal seams: A case study in the Shendong Coalfield of China, *Int. J. of Coal Geol.*, 2011, No. 86. — P. 190–196.
23. **Chi Mingbo, Zhang Dongsheng, Liu Hongzhi, Zhou Yazhou, Zhang Shuai, Yu Wei, Liang Shuaishuai, and Zhao Qiang.** Simulation analysis of water resource damage feature and development degree of mining-induced fracture at ecologically fragile mining area, *Env. Earth Sci.*, 2019, No. 78. — P. 88.

24. **Huang Qingxiang, He Yanpeng, and Cao Jian.** Experimental investigation on crack development characteristics in shallow coal seam mining in China, *J. Energies*, 2019, Vol. 12, No. 7. — P. 1302.
25. **Fang X. Q., Huang H. F., Jin T., and Bai J. B.** Movement rules of overlying strata around longwall mining in thin bedrock with thick surface soil, *Chinese J. of Rock Mech. and Eng.*, 2008, Vol. 27, No. 1. — P. 2700–2706.
26. **Gu Dazhao.** Similar materials and similar simulation, Xuzhou: China University of Min. and Tech. Press, 1995.
27. **Li Wenping, Ye Guijun, Zhang Lai, Duan zhonghui, and Zhai Lijuan.** Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yu Shen Fu mine area in the north Shan Xi province, *J. of China Coal Soc.*, 2000, Vol. 25, No. 5. — P. 449–454.
28. **Fan Limin, Jiang Zequan, and Xu Kaicang.** Research on coal mining under competent loose aquifer and properties of aquiclude in Yushen mining area, *J. Coal Geol. of China*, 2003, Vol. 15, No. 4. — P. 25–30.
29. **Li Hongchang.** Similar simulation test of mine pressure, Xuzhou: China University of Min. and Tech. Press, 1988.
30. **Huang Qingxiang, Hou Zhicheng, Zhang Wenzhong, and Zhang Pei.** Orthogonal tests on cementing agents of similar of clay aquiclude, *J. Min. and Safety Eng.*, 2007, Vol. 24, No. 1. — P. 42–46.
31. **Huang Qingxiang, Zhang Wenzhong, and Hou Zhicheng.** Study of simulation materials of aquifuge for solid-liquid coupling, *Chinese J. of Rock Mech. and Eng.*, 2010, Vol. 29, No. 1. — P. 2813–2818.
32. **Wolfgang R. Jacoby and Harro Schmeling.** Frankfurt, convection experiments and the driving mechanism, *Int. J. of Earth Sci., Geol. Rundschau*, 1981, Vol. 70, No. 1. — P. 207–230.
33. **Kincaid C. and Olson P.** An experimental study of subducting slab migration, *J. Geoph. Res.*, 1987, Vol. 92, No. 3. — P. 832–840.
34. **Li Yong, Zhu Weishen, Wang Hanpeng, Li Shucui, and Zhang Qiangyong.** Study on mechanical experiment of a new type of geotechnical analogue material, *Tunnel Construction*, 2007. — P. 197–200.

Поступила в редакцию 13/1 2020
После доработки 31/IV 2020
Принята к публикации 09/VII 2020