

УДК 622.831

**ЗОНАЛЬНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ВОКРУГ ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК**

М. Ройтер, М. Крах, У. Кислинг, Ю. Векслер

*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, E-mail: mkrach@marco.de,
Hans-Boeckler-Strasse, 2, 85221, Dachau, Германия*

Приводятся результаты расчетов разрушения горных пород вокруг очистных выработок угольных шахт на основе решения плоской задачи теории ползучести с большими деформациями. Показан случай некольцеобразного образования областей наведенной дезинтеграции и влияния на процесс горно-геологических параметров массива.

Дезинтеграция, лава, структура, глубина, коэффициент бокового давления, время

Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных горных выработок, заключающееся в образовании кольцеобразных областей разрушения в массиве на некотором удалении от их контура, обнаружено при натуральных наблюдениях в шахтах [1]. В дальнейшем оно исследовалось многократно теоретически и экспериментально. Теоретические исследования проводятся в основном для горных выработок кругового профиля поперечного сечения. В работе [2] доказывается пространственное чередование кольцеобразных форм дезинтеграции горных пород вокруг выработки. Такая же концепция развивается в [3, 4]. В работе [5] установлены радиальная протяженность зон разрушения массива и существенное влияние крепи на параметры зональной структуры разрушения. В работах [6, 7] рассматривается деформирование пород вокруг тоннелей круглого сечения. В [6] исследуется модель дезинтеграции, связанная с образованием микротрещин, в [7] зональная дезинтеграция пород обусловлена образованием различных по величине деформаций сдвига, образующих изолированные или пересекающиеся одна с другой кольцевые зоны.

Однако в неоднородном массиве с различными физико-механическими свойствами отдельных слоев возможны и другие конфигурации зон разрушения вокруг выработок. Расчеты в [8] показывают, что в слоистом горном массиве некольцевые зоны разрушения ограниченных размеров могут возникать в крепких породах кровли пласта вдали от контура выработок при повышенном боковом давлении.

Рассмотрим обусловленную горными работами наведенную дезинтеграцию массива горных пород вокруг очистных забоев.

РАСЧЕТЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРЕСТНОСТИ ЛАВЫ

Рассмотрена плоская задача теории ползучести с большими деформациями и разрушением для лавы при вязкоупругой модели горных пород с физическими уравнениями [9]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] + \int_0^t [\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)] \frac{d\tau}{3GT}, \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] + \int_0^t [\sigma_2 - 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)] \frac{d\tau}{3GT}, \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] + \int_0^t [\sigma_3 - 0.5(\sigma_1 + \sigma_2)] \frac{d\tau}{3GT}.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные напряжения и главные деформации; E, G — модули упругости и сдвига; ν — коэффициент Пуассона горной породы. В качестве $1/T$ принято ядро ползучести типа Абея $1/T = \delta(1 - \alpha)^{-\alpha}$; α, δ — параметры ползучести горной породы, t — время.

Задача решается методом конечных элементов шагами по времени. Разрушение вмещающего массива пород на каждом из шагов рассчитывается по критерию максимального нормального напряжения и закону Кулона–Мора, а разрушение со временем — по условию накопления повреждаемости Бейли:

$$\sum \frac{\Delta t_k}{T_k(\sigma_i)} = 1, \quad (2)$$

где Δt_k — интервал времени, на котором напряжения являются постоянными; $T_k(\sigma_i)$ — долговечность горных пород.

Долговечность горных пород при постоянной нагрузке определяется выражением, полученным в результате решения плоской задачи теории ползучести для полого трубчатого образца [10]:

$$T_k(\sigma_i) = [E\varepsilon_* / 2.25\sigma_i\delta^{0.85}]^{3.92}, \quad (3)$$

где ε_* — предельная деформация; σ_i — интенсивность напряжений.

В качестве предельной деформации принято установленное в экспериментах по всестороннему сжатию толстостенных трубчатых образцов выражение [11]

$$\varepsilon_* = (1.347 - 0.224 \cdot 10^{-4} E) \cdot 10^{-2}. \quad (4)$$

Процедура решения задачи методом конечных элементов приведена в [12]. Если элементы, удовлетворяющие условиям разрушения, расположены у контура выработки и могут отделиться от него, например при отсутствии крепи, то они удаляются из расчетной схемы. В противном случае у них уменьшаются модуль упругости и прочностные параметры. Расчет при этом не прерывается.

В расчетных схемах всех вариантов предполагается залегание в почве алевролита, в непосредственной кровле — аргиллита, а в основной кровле — песчаника. Значения физических свойств горных пород приняты по данным литературы. На рис. 1–6 представлены вертикальные разрезы массива с лавой. Рассматривается горизонтальное положение пласта. Закономерности образования зон разрушения вдали от контура лавы определяются для принятых конкретных условий.

На рис. 1 показано развитие разрушений горных пород вокруг очистного забоя в течение одного рабочего цикла (54 мин): от распора секции крепи, ее передвижки и следующего распора после передвижки. Расчеты выполнены для мощности пласта и непосредственной кровли 2 и 8.3 м и глубины разработки 400 м. Расчетная схема задачи соответствует началу цикла. Здесь и далее разрушенные участки массива в почве, в пласте и в непосредственной кровле заштрихованы.

На рис. 2–6 расчеты проведены до момента окончания рабочего цикла в лаве; показано влияние горнотехнических факторов на конфигурацию и величину зон разрушения (растрескивания) в массиве: на рис. 2 и 3 — влияние глубины разработки и мощности пласта; на рис. 4 и 5 — влияние коэффициента бокового давления и структуры массива горных пород; на рис. 6 — влияние начального распора крепи.

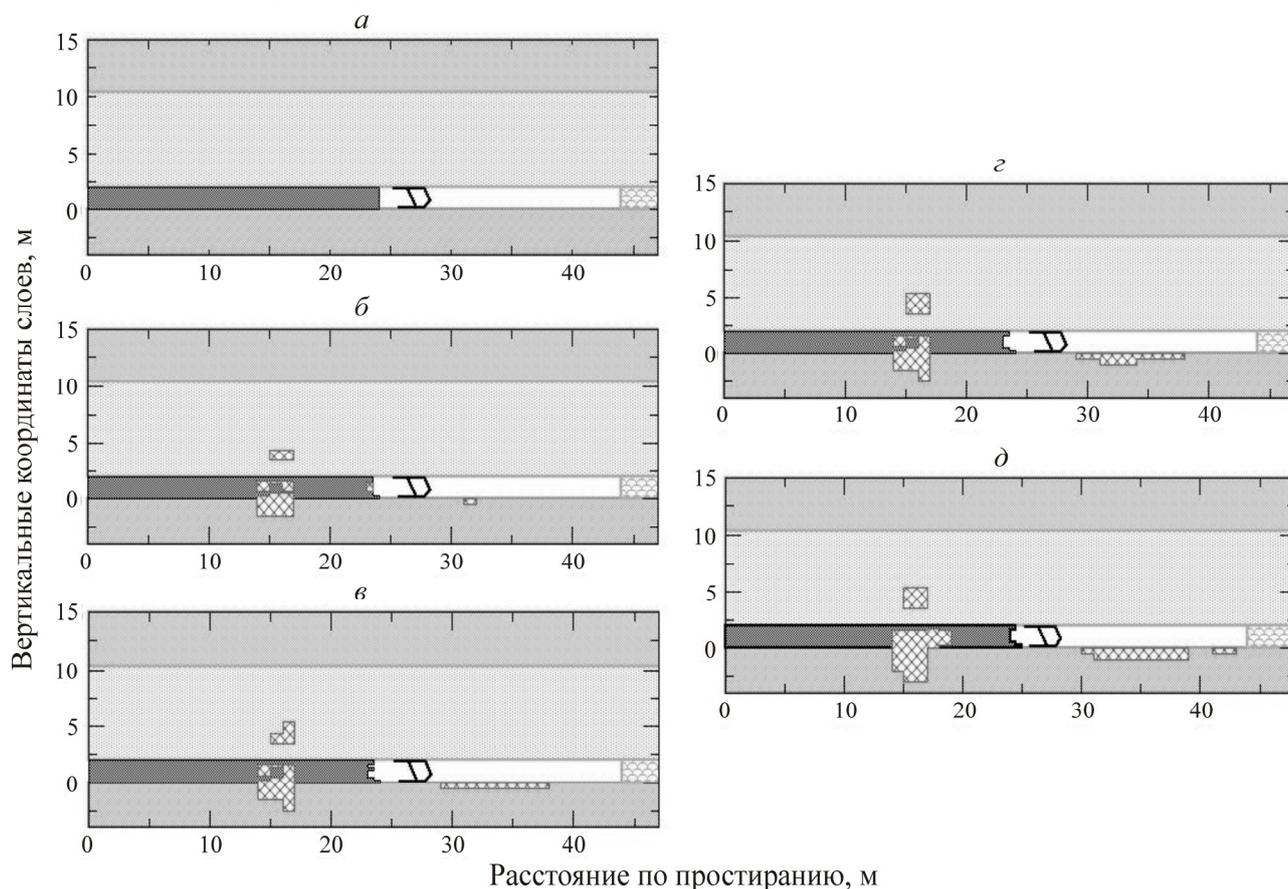


Рис. 1. Дезинтеграция вмещающих очистной забой пород во времени: *а* — расчетная схема задачи; *б–д* — ситуации для моментов времени после распора секции крепи, соответственно 1, 3, 10 и 59 мин

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно результатам расчетов, разрушение горных пород происходит впереди забоя лавы, а также в почве выработанного пространства (см. рис. 1). Уже на 1-й минуте рабочего цикла разрушается забой лавы (падает раскоска пласта шириной 0.5 м). Одновременно образуются зоны разрушения в пласте, почве и непосредственной кровле в 7 м впереди забоя лавы. На данный момент времени разрушения происходят в почве (длина зоны по простиранию и ее глубина 3 и 1.5 м) и в непосредственной кровле (соответственно 2 и 0.8 м). В пласте и почве выработанного пространства образуются зоны длиной 3 и 1 м.

К 3-й минуте продолжается разрушение забоя лавы, а зоны разрушения в почве и кровле увеличиваются на 1 м с боков со стороны лавы. Зона разрушения в почве выработанного пространства достигает длины 9 м. К 10-й минуте увеличиваются только зоны разрушения в кровле и почве выработанного пространства, а на 54-й минуте, к концу рабочего цикла, область разрушения в пласте простирается до 7 м почти на его полную мощность, располагаясь на рас-

стоянии 5 м от забоя. Значительно увеличиваются также зоны растрескивания в почве пласта и в выработанном пространстве, возникает новая небольшая область разрушения в почве у обрушенных пород. К концу цикла единая зона разрушения в пласте и почве впереди лавы увеличивается почти в 2 раза по сравнению с ситуацией в начале цикла.

Зоны разрушения возникают поочередно в разных слоях массива горных пород. В зависимости от интенсивности выделения энергии возможно инициирование динамических проявлений горного давления. Активность процессов в почве выработанного пространства может привести здесь к внезапным выбросам.

Далее рассмотрим влияние на дезинтеграцию горных пород основных горнотехнических факторов. Глубина разработки в наибольшей мере влияет на разрушение почвы (рис. 2). Увеличение глубины с 400 до 620 м приводит к увеличению области разрушения в почве впереди лавы в 10 раз и в окрестности выработанного пространства — в 1.5 раза. Зоны разрушения в пласте при этом практически одинаковы.

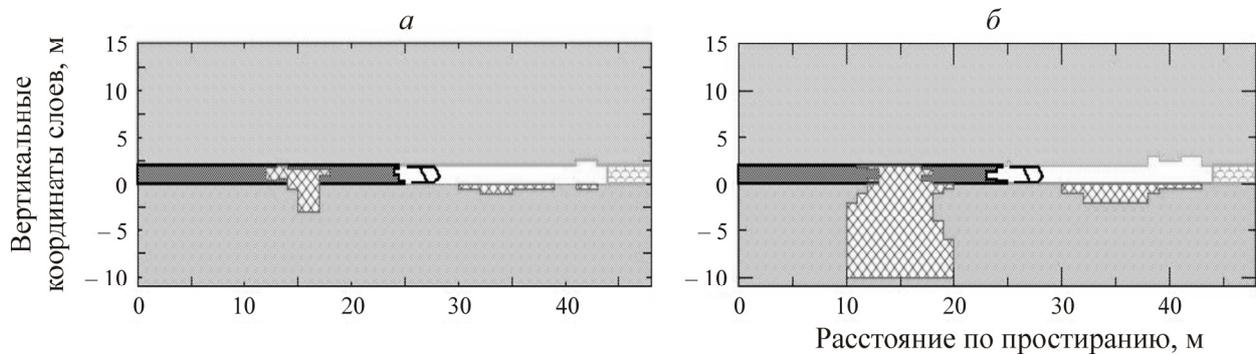


Рис. 2. Зоны дезинтеграции на разных глубинах: *a* — 400 м; *б* — 620 м

Зоны разрушения возрастают с увеличением мощности пласта (рис. 3). При мощности пласта 1.1 м зона разрушения в 6 м от нового контура забоя лавы представляет собой узкую полосу длиной 4 м и толщиной 0.2 м. Зона разрушения в почве распространится на глубину до 3.5 м при максимальной ширине 5 м. При мощности пласта 2.9 м она охватывает практически всю мощность пласта на длине 6 м. Разрушение забоя лавы в середине мощности пласта увеличивается до 2 м, приближаясь к растрескавшейся части пласта до 2 м. Разрушения в почве выработанного пространства практически одинаковые.

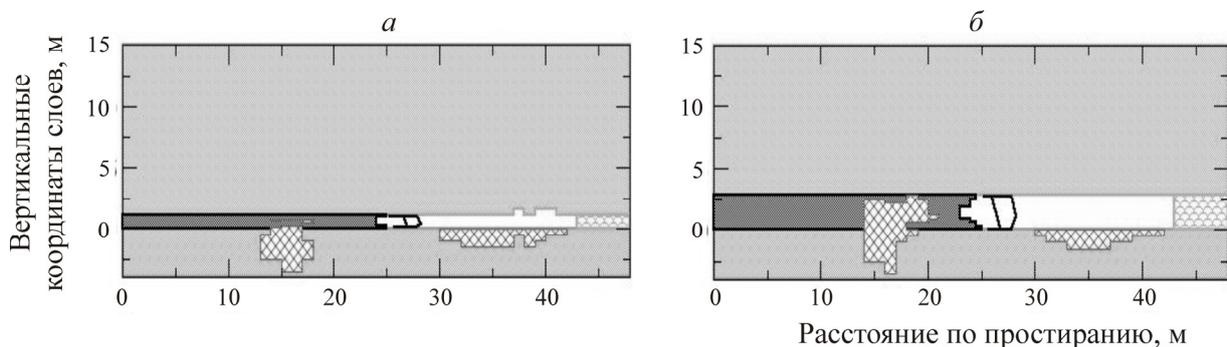


Рис. 3. Влияние мощности пласта на дезинтеграцию пород: *a* — 1.1 м; *б* — 2.9 м

Коэффициент бокового давления λ влияет в основном на разрушение кровли и почвы в выработанном пространстве (рис. 4). При $\lambda = 0.5$ разрушается кровля пласта и возникает об-

ширная зона разрушения в почве. С увеличением λ до 1.0–2.0 зона разрушения в почве значительно уменьшается и кровля не разрушается. Зоны разрушения в пласте и почве впереди лавы при этом также незначительно уменьшаются.

Влияние структуры массива на дезинтеграцию горных пород показано на рис. 5. При отсутствии непосредственной кровли зона разрушения впереди забоя лавы возникает только в пласте. При мощности непосредственной кровли 1.5 м зона разрушения в пласте незначительно развивается в непосредственную кровлю. При мощности непосредственной кровли 11.3 м в ней возникает зона разрушения впереди лавы выше пласта. Зоны разрушения в почве выработанного пространства практически одинаковы.

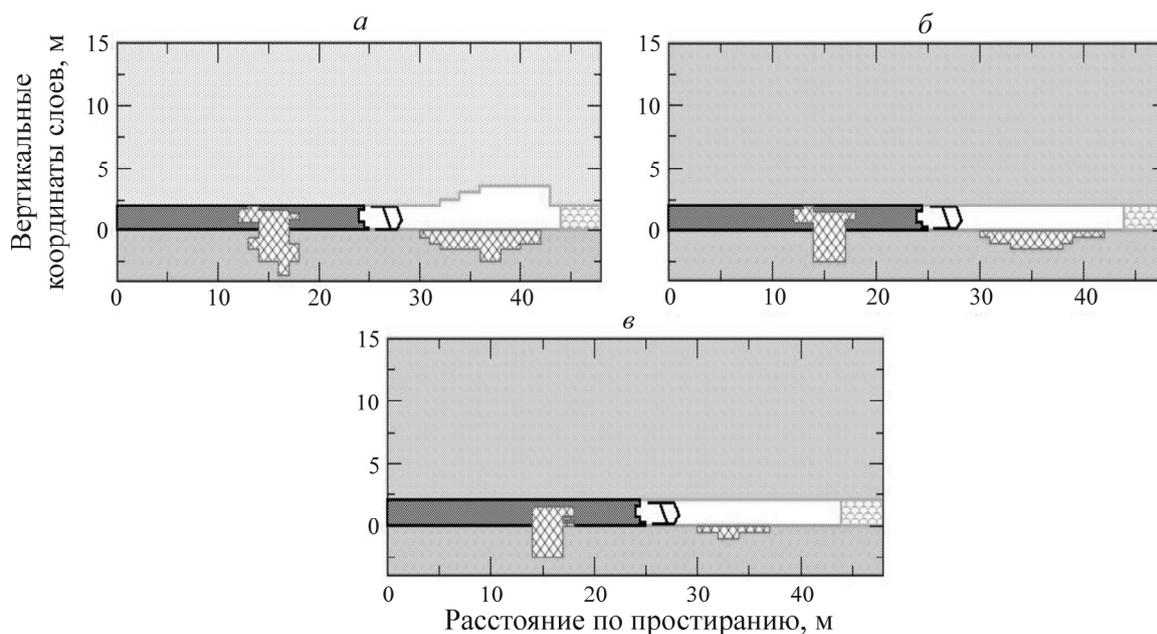


Рис. 4. Зоны дезинтеграции при разных коэффициентах бокового давления: *a* — 0.5; *b* — 1.0; *v* — 2.0

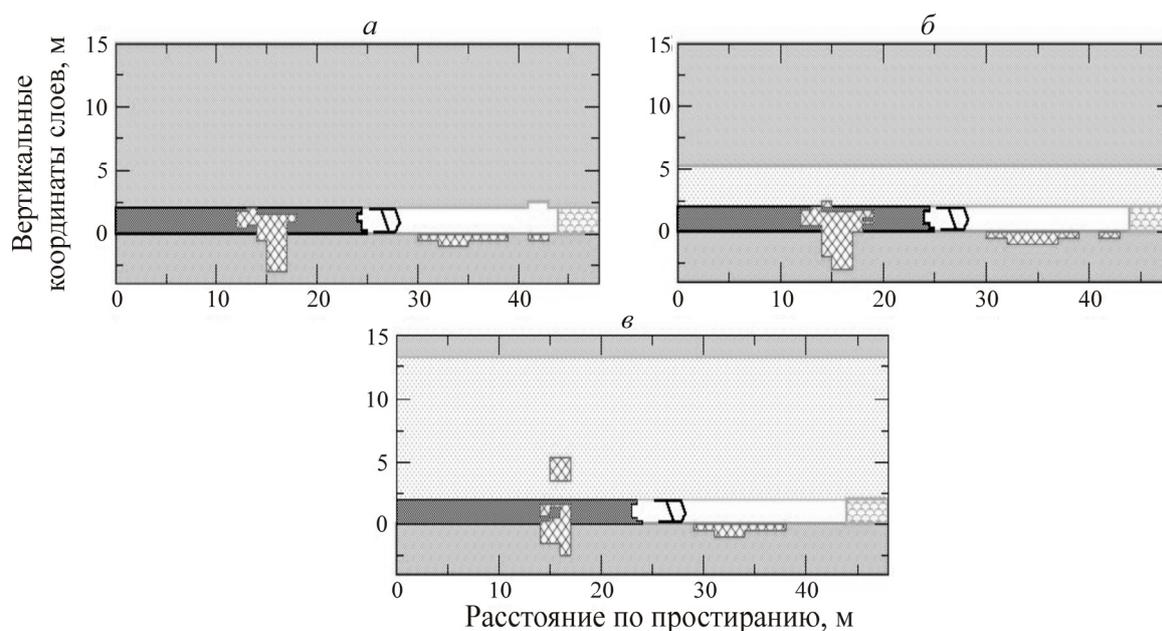


Рис. 5. Влияние структуры массива на дезинтеграцию: *a* — непосредственная кровля отсутствует; *b* — мощность непосредственной кровли 1.5 м; *v* — 11.3 м

На рис. 6 показано влияние начального распора крепи. Рассмотрено поперечное сечение массива с лавой длиной 140 м вдоль секций крепи; представлена только левая половина длины лавы; мощность пласта 2 м, глубина разработки 600 м. При среднем по лаве начальном распоре крепи 164 бар в первые 4 мин после начала цикла разрушения в непосредственной и основной кровле не происходят. При снижении начального распора до 134 бар образуется зона разрушения в более крепких породах основной кровли длиной 24 м и толщиной 1 м. Если при этом уменьшить начальный распор нескольких секций до 15 бар (в данном примере у 4 секций, показанных черной линией на длине лавы 26–32 м) и выдержать такое нагружение в течение 4 мин, то зона разрушения в основной кровле удлинится до 45 м и расширится до 3 м. Кроме того, возникнет новая небольшая зона разрушения в непосредственной кровле над разгруженными секциями крепи на контакте с перекрытием крепи. Таким образом, дезинтеграцией горных пород вокруг очистных забоев можно управлять путем вариации начального распора крепи.

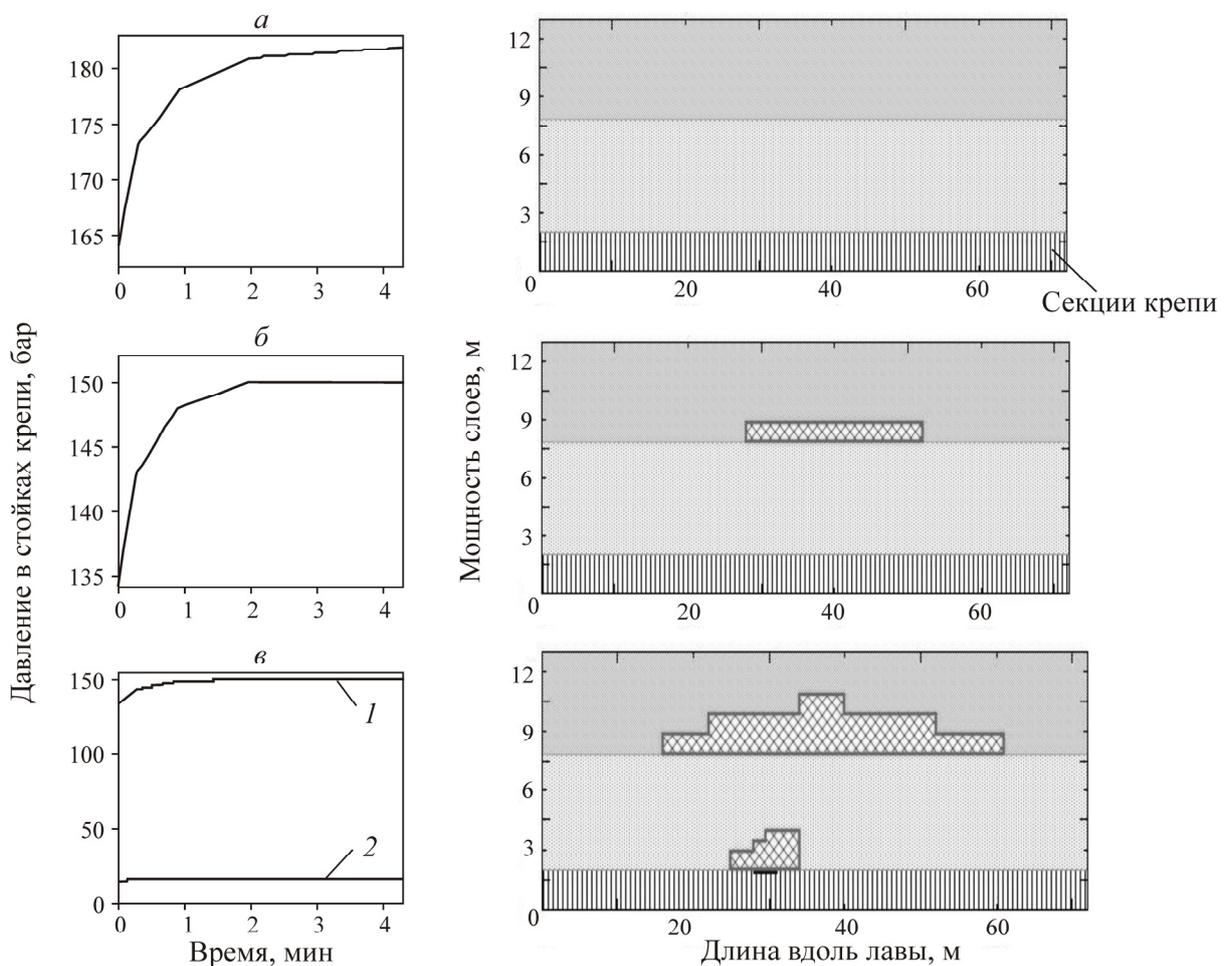


Рис. 6. Влияние распора крепи на дезинтеграцию горных пород: слева — начальные распоры стоек; справа — вертикальные сечения массива с лавами; а — начальный распор крепи 164 бар; б — 134 бар; в — 134 бар (1), 15 бар (2)

Перемещаясь в выработанное пространство лавы, растрескавшиеся породы в основной кровле будут играть роль “зародышей разрушения” и способствовать ее дальнейшему обрушению и соответственно уменьшению зависания пород за крепью. Метод разупрочнения кровли путем комбинации “разгрузка–нагружение” крепи при 4-минутной выдержке может быть автоматизирован системой управления Марко [13].

ВЫВОДЫ

Таким образом, в рамках предложенной авторами теоретической расчетной схемы в окрестности очистных выработок могут образовываться и увеличиваться со временем зоны наведенной дезинтеграции горных пород некруговой формы.

Из основных горнотехнических факторов наибольшее влияние на величину зон разрушения оказывает глубина разработки.

Процессом наведенной дезинтеграции можно управлять путем уменьшения начального распора у нескольких секций крепи в течение нескольких минут в начале рабочего цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шемякин Е. И., Фисенко Г. А., Курленя М. В., Опарин В. Н. и др.** Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч I. Данные натурных наблюдений // ФТПРПИ. — 1986. — № 3.
2. **Опарин В. Н.** Явление зональной дезинтеграции горных пород и начала “квантовой геомеханики” // 2-я Рос.-Кит. науч. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”: сб. тр., 02–05 июля 2012 г., Новосибирск. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
3. **Полевщиков Г. Я., Плаксин М. С.** Газодинамическая активность угольных пластов и зональная дезинтеграция массива горных пород при проведении подготовительных выработок // 2-я Рос.-Кит. науч. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”: сб. тр., 02–05 июля 2012 г., Новосибирск. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
4. **Mirenkov V. E.** Zonal disintegration of rock mass around an underground excavation, *Journal of Mining Science*, 2014, Vol. 50, No. 1.
5. **Макаров В. В., Ксендзенко Л. С., Голосов А. М., Опанасюк Н. А.** Влияние отпора крепи на параметры зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг закрепленной выработки // 4-я Рос.-Кит. науч. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”: сб. тр., 27–31 июля 2014 г., Владивосток. — Владивосток: ДВФУ, 2014.
6. **Zhou X., Qian Q.** Zonal disintegration mechanism of the microcrack-weakened surrounding rock mass in deep circular tunnels, *Journal of Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 2.
7. **Wang X., Pan Y., and Zhang Z.** A spatial strain localization mechanism of zonal disintegration through numerical simulation, *Journal of Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 3.
8. **Векслер Ю. А.** Кинетика разрушения массива вокруг горных выработок // ФТПРПИ. — 1986. — № 6.
9. **Гуревич Г. И.** О соотношении упругих и остаточных деформаций в общем случае однородного напряженного состояния // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. — 1953. — № 21.
10. **Ержанов Ж. С., Сагинов А. С., Векслер Ю. А.** Расчет устойчивости горных выработок, подверженных большим деформациям. — Алма-Ата: Наука, 1973.
11. **Векслер Ю. А., Гуменюк Г. Н.** Предельные деформации как критерий разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 1977. — № 1.
12. **Векслер Ю. А., Тутанов С. К.** Расчет больших деформаций ползучести и разрушения горных пород вокруг выработок // Прикл. механика. — 1983. — Т. XIX. — № 8.
13. **Ройтер М., Векслер Ю.** Метод предотвращения динамических проявлений горного давления // Уголь Кузбасса. — 2010. — Июль–август.

Поступила в редакцию 25/XI 2014