

УДК 622.831

**О ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ
ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ
НА ШАХТЕ “ПОЛЫСАЕВСКАЯ” В КУЗБАССЕ**

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

*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH, E-mail: sekretariat@marco.de,
Hans-Boeckler-Str., 2, 85221, г. Дахау, Германия*

Приведены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и разрушения массива горных пород в окрестности очистного забоя в газонасыщенном угольном пласте шахты “Полысаевская” ОАО “СУЭК-Кузбасс”. Показано влияние глубины разработки и давления газа в пласте на геомеханическую ситуацию в окрестности лавы. Рассмотрены варианты возникновения ориентированных трещин впереди забоя лавы.

Лавы, пласт, напряжения, смещения, давление газа, разрушение, трещины

Необходимым компонентом повышения производительности и безопасности работ в автоматизированных очистных забоях угольных шахт является мониторинг геомеханической ситуации на пластах, опасных по динамическим проявлениям горного давления. Исследования формирования и развития очагов разрушения в окружающем массиве, представляющих опасность горных ударов и выбросов, в настоящее время актуальны [1]. Важность информации о свойствах и деформациях массива для определения параметров технологий добычи, особенно на больших глубинах, отмечена в [2]. Такая информация может быть получена из результатов расчетов напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистных забоев. Эффективный метод решения задач геомеханики — метод конечных элементов, позволяющий учесть структуру и разрушение пласта и вмещающих пород в течение рабочего цикла лавы и ее последующего подвигания. В данной работе анализируется геомеханическая ситуация в двух лавых на шахте “Полысаевская” ОАО “СУЭК-Кузбасс” на разных глубинах разработки.

РАСЧЕТ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОКРЕСТНОСТИ ЛАВЫ

Расчет напряженно-деформированного состояния массива выполнен по пласту “Бреевский” в окрестности лавы 17-47 на глубине разработки 360 м и лавы 17-53 на глубине 550 м. Рассмотрена плоская задача теории ползучести с большими деформациями и разрушением для вязкоупругой модели горных пород. Алгоритм решения задачи методом конечных элементов описан в [3].

Пласт “Бреевский” является угрожаемым по горным ударам. По внезапным выбросам угля и газа он опасен с глубины 560 м. Расчеты проведены для установленной на шахте максимальной глубины разработки 550 м. В расчетной схеме задачи учтена структура массива горных пород, приведенная в геологических разрезах шахты: пласт угля мощностью 1.61 м имел прослойку мелкозернистого алевролита средней мощности 0.03 м в его середине; ложная кровля состояла из алевролита мощностью 0.1 м; непосредственная и основная кровля представлены среднезернистым алевролитом разной прочности, ложная и основная почва — мелкозернистым алевролитом (рис. 1а).

В “Техническом задании” шахты “Польсаевская” указаны пределы прочности горных пород на одноосное сжатие $[\sigma]$, одноосное растяжение $[\sigma]_p$ и коэффициент крепости пород f . (Предел прочности пород на растяжение учитывается и в расчетах [4].) По приведенным данным вычислены значения параметров закона прочности Кулона–Мора: угол внутреннего трения пород ρ из выражения (1):

$$[\sigma]_p = \frac{[\sigma](1 - \sin \rho)}{2(1 + \sin \rho)} \quad (1)$$

и сцепление C из выражения (2) при установленном угле ρ :

$$C = \frac{[\sigma](1 - \sin \rho)}{2 \cos \rho}. \quad (2)$$

Модуль упругости горных пород принят с учетом их коэффициента крепости f и прочности на одноосное сжатие $[\sigma]$.

Таким образом получены все необходимые для расчета механические параметры горных пород. Первоначальное напряженное состояние массива принято гидростатическим. При требуемых шахтой скорости подачи комбайна по врубу и по зачистке соответственно не менее 14 и 25 м/мин время рабочего цикла для лавы длиной 310 м принято равным 54 мин. Во всех вариантах начальный распор секций крепи составлял 28 МПа, давление обрушенных пород на почву в выработанном пространстве — $(0.07 - 0.1)\gamma H$.

Расчеты выполнены для условий работы лавы при вторичных осадках кровли. Поскольку непосредственная кровля является среднеустойчивой, в расчетной схеме принято ее обрушение за завальным ограждением крепи на четырехкратную мощность пласта. Напряженно-деформированное состояние пород в окрестности лавы рассчитывалось через каждый метр ее продвижения при изменении длины пролета непосредственной кровли в выработанном пространстве лавы L от 3 до 14 м. Результаты расчетов показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1б, в скорость конвергенции забоя лавы и давления в крепи со временем уменьшаются. С увеличением глубины разработки конвергенция возрастает, а давление в крепи падает при одинаковом начальном распоре крепи для обоих вариантов. С удлинением пролета кровли конвергенция забоя увеличивается линейно (рис. 1г), а давление в крепи возрастает незначительно (рис. 1д). Увеличение пролета кровли с 7 до 14 м влияния на давление в крепи практически не оказывает.

Полученные закономерности изменения конвергенции и давления в крепи, соответствующие принятым горно-геологическим условиям, можно объяснить следствием разрушения пласта и пород кровли и почвы в окрестности лавы. На рис. 2 приведены результаты расчетов областей разрушения для лавы при разных длинах пролета кровли и глубинах разработки.

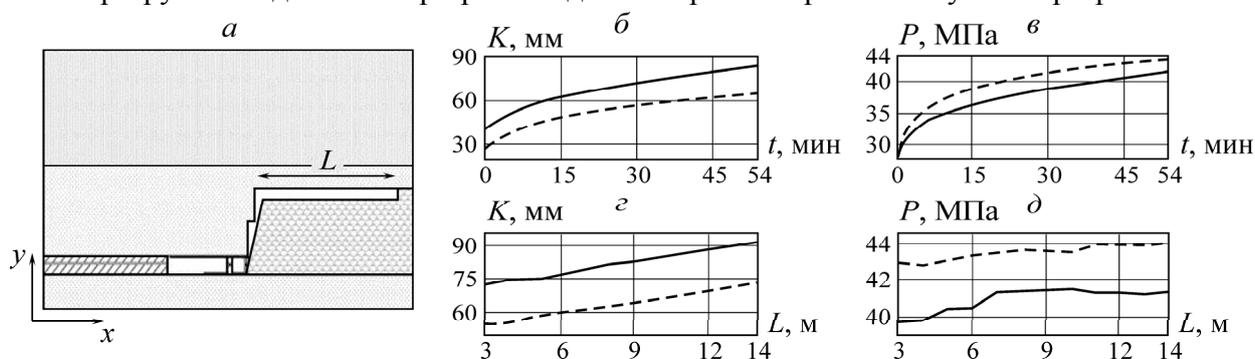


Рис. 1. Геомеханическая ситуация в окрестности лавы на глубине 360 (штриховая) и 550 м (сплошная линия): а — расчетная схема задачи; б и в — зависимости конвергенции забоя лавы K и давления в стойках крепи P от времени; г и д — зависимости K и P от L в конце рабочего цикла

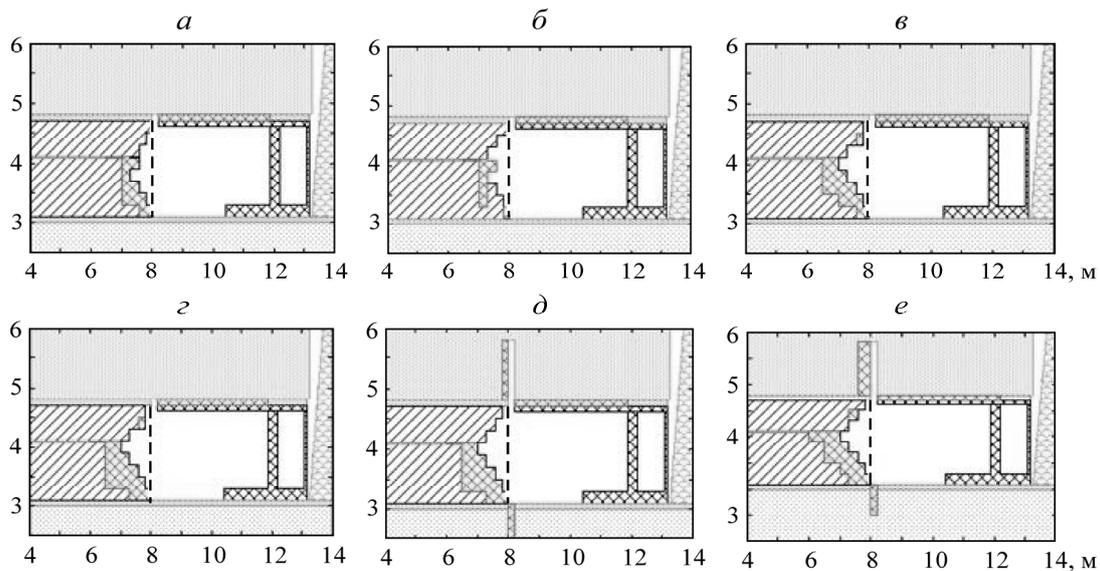


Рис. 2. Отжим пласта и образование зон трещиноватости (заштрихованы) на глубине 360 м (*a–в*) и 550 м (*г–е*) при L , м: *a, г* — 3; *б, д* — 6; *в, е* — 14; штриховая линия — начальное положение забоя лавы

Разрушение пласта проявляется в виде отжима забоя и возникновения трещиноватых зон, а также образования заколов (крупных трещин) в кровле между козырьком крепи и забоем. Отжим забоя происходит до глубины 1 м, вследствие чего в нем образуется новый контур. Полный или частичный вывал угля из зоны отжима будет зависеть от сцепления кусков угля, поэтому пространство у новой границы забоя может быть заполнено разрушенным углем. На глубине 360 м отжим пласта увеличивается с удлинением пролета кровли до 14 м (рис. 2*a–в*), на глубине 550 м — только до пролета 6 м (рис. 2*г*). Дальнейшее удаление забоя на отжим пласта не влияет. Площадь отжима пласта незначительно увеличивается с удлинением пролета кровли и ростом глубины разработки. Увеличение начального распора крепи к предотвращению заколов в кровле не приводит.

На рис. 3 показана последовательность обрушения непосредственной кровли в течение четырех рабочих циклов (в первые 220 мин) при перемещении заколов в выработанное пространство лавы. В этом случае заколы в кровле являются “зародышами разрушения”. Видно, что по линии заколов произошло обрушение непосредственной кровли на высоту 1.1 м. У ранее обрушенных пород в выработанном пространстве закол увеличился на 3 м и расширился до 0.45 м, а также возник новый закол. Ближайшие к лаве заколы выросли на 1 м. В дальнейшем фронт разрушения двигался к лаве от уже обрушенных пород. Растрескавшиеся породы между заколами (заштрихованы) обрушатся в течение следующих рабочих циклов.

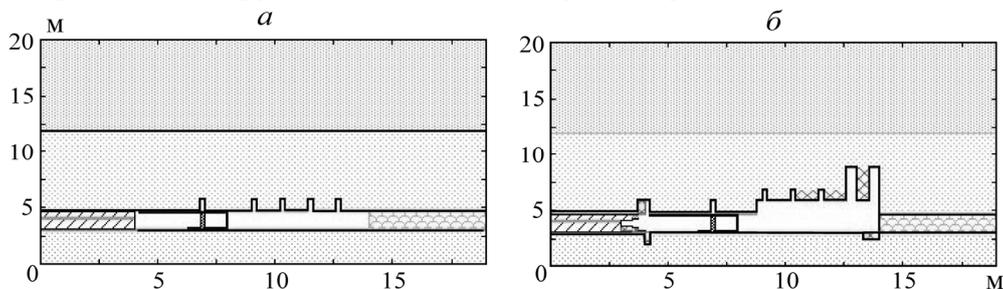


Рис. 3. Обрушение пород в непосредственной кровле выработанного пространства: *a* — расчетная схема задачи с пятью заколами в непосредственной кровле; *б* — обрушение кровли после четырех расчетных циклов

Ситуации с отжимом и образованием трещиноватых зон изменяются через каждые 3–5 м подвигания лавы. Зоны трещиноватости на обеих глубинах возникают в нижнем слое пласта и ограничены ложной почвой и породным прослойком в середине пласта (см. рис. 2). При пролете кровли 14 м на глубине 550 м небольшая зона трещиноватости возникает и в верхнем слое пласта. Образование зон трещиноватости увеличивает податливость пласта и приводит к росту конвергенции забоя и уменьшению давления в крепи (см. рис. 1). Растрескивание пород снижает их модуль упругости. Уменьшение модуля упругости пород и снижение интенсивности горного давления описывается в [2, 5] как результат образования в приконтурной зоне выработки “переходных” или “демпферных слоев”. В [5] предлагается создавать такие зоны искусственно.

Разрушение непосредственной кровли существенно зависит от глубины разработки. Заколы и трещины в кровле и почве пласта в течение рабочего цикла возникают только на глубине 550 м начиная с длины пролета кровли 6 м. Рядом с заколами в непосредственной кровле происходят растрескивания, расширяющиеся с удлинением пролета. В большей степени глубина разработки влияет на растрескивание пласта впереди забоя, чем на его отжим. Площадь отжима пласта на глубине 550 м незначительно больше, чем на глубине 360 м, а площадь зоны растрескивания заметно больше. Увеличение пролета кровли на глубине 550 м на площадь отжима пласта практически не сказывается.

Рассмотрим особенности напряженно-деформированного состояния пласта впереди забоя лавы. На рис. 4 показаны расчетные распределения вертикальных нормальных напряжений сжатия σ_y и горизонтальных смещений пласта u_x . Вертикальные напряжения сжатия (рис. 4а) формируют опорное давление в пласте впереди забоя лавы. Вследствие разрушения призабойной части пласта максимумы давления на обеих глубинах смещаются от забоя в массив на 1.2–1.8 м. При рассчитанных пролетах непосредственной кровли 6–14 м удаление максимума давления от забоя не зависит от длины пролета.

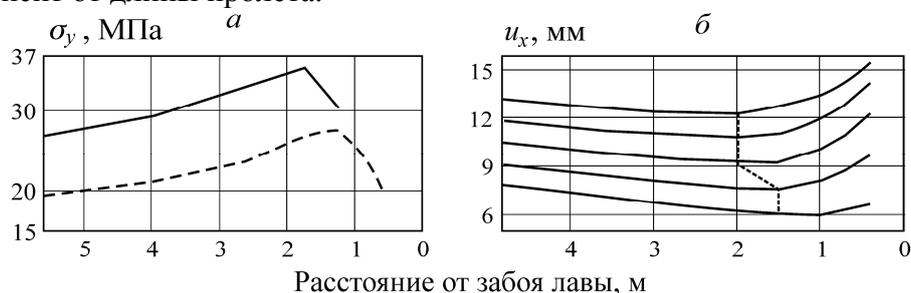


Рис. 4. Вертикальные напряжения сжатия на глубинах 360 и 550 м (штриховая и сплошные линии соответственно) (а) и горизонтальные смещения пласта впереди забоя лавы, соответствующие расположению горизонтальных уровней пласта по мощности от 0.2 до 1.08 м (снизу вверх)

Интегральным показателем геомеханического состояния пласта являются его деформации. В вертикальном направлении пласт впереди забоя сжимается. Иная ситуация возникает в направлении простирания лавы (рис. 4б). На расстоянии 1.5–2.0 м от забоя происходит растяжение пласта: здесь горизонтальные смещения по направлению к забою увеличиваются. На расстоянии более 2 м от забоя горизонтальные смещения растут с удалением от него и пласт сжимается. Пунктир на рисунке обозначает границу раздела зон растяжения и сжатия пласта по простиранию.

Установлено, что растрескивание пласта происходит в зоне его растяжения (см. рис. 2). В этой зоне возникают трещины разной длины и направленности. Согласно расчетам [6], такие трещины могут развиваться в направлении максимального сжимающего главного напряжения σ_1 под углом α_1 или вдоль плоскости максимального касательного напряжения под углом 45° к направлению σ_1 , но при дополнительном гидростатическом давлении [7] или параллельно забою вследствие деформации растяжения пласта по простиранию.

Рассмотрим ситуацию с трещиной в конечном элементе, разделяющей его на две части. На рис. 5 показаны возможные варианты ориентации трещин на глубине 550 м на участке пласта в зоне разрушения. Угол α_1 между максимальным главным напряжением σ_1 и осью x находится из выражения [8]

$$\operatorname{tg} 2\alpha_1 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (3)$$

где σ_x, σ_y — нормальные напряжения; τ_{xy} — касательное.

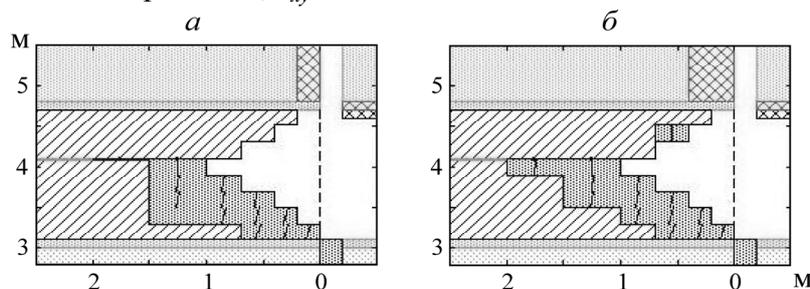


Рис. 5. Вероятные ориентации трещин (сплошные линии) под углом α_1 с длиной пролета кровли, м: a — 6; b — 14 (штриховая линия — начальное положение забоя лавы)

Как показывают результаты расчетов, в зоне растяжения возникают практически параллельные “ориентированные трещины” с углами наклона $\alpha_1 = 1 - 15^\circ$ в сторону забоя. С удалением от забоя в массив углы наклона уменьшаются, трещины становятся параллельными забою. С увеличением пролета кровли трещины образуются на большем удалении от пласта. Находящийся в пласте под давлением метан может выделиться в эти трещины и создать выбросоопасную ситуацию [6]. Анализ распределения касательных напряжений в непосредственной кровле показывает, что возможные трещины будут направлены также в сторону забоя лавы. Таким образом, на глубине 550 м формируются условия, необходимые для внезапных выбросов угля и газа.

Взаимодействие между возникшими трещинами может происходить путем разрушения перемычки между ними с образованием новых мелких трещин [9]. При больших расстояниях между трещинами со временем может произойти их слияние [10]. В газонасыщенном пласте в зависимости от последовательности и скорости слияния трещин в угле могут возникать фронты разрушения и создаваться необходимые условия для появления волны выброса [6, 11].

Рассмотрим геомеханическую ситуацию в пласте впереди забоя лавы на глубине разработки 550 м при длине пролета кровли в выработанном пространстве 14 м с одиночной трещиной длиной 0.78 м и шириной 1 см. Давление газа — 2 и 3 МПа. (Соответствует давлению метана в пласте “Болдыревский” на шахте “им. Кирова” 2.3–2.5 МПа на глубине 400 м [12].)

Как видно из рис. 6а, при отсутствии газа в трещине область разрушения в средней части пласта простирается до 2 м от забоя. При давлении газа в трещине 2 МПа растрескивание происходит на таком же удалении от забоя, но в большем объеме (рис. 6б). Трещина растет вверх на 0.23 м в направлении максимального напряжения сжатия. При давлении газа в трещине 3 МПа растрескивание в нижней части пласта происходит только до трещины, играющей в этом случае блокирующую роль. Сама трещина растет вертикально вверх и вниз, а ее длина увеличивается почти на всю мощность пласта до 1.41 м (рис. 6в). В результате такого роста трещины может произойти вывал большого блока пласта в призабойное пространство лавы.

Таким образом, давление газа в трещине приводит к разным качественным закономерностям растрескивания массива: от расширения за трещиной при давлении газа 2 МПа и до блокировки перед ней при давлении 3 МПа.

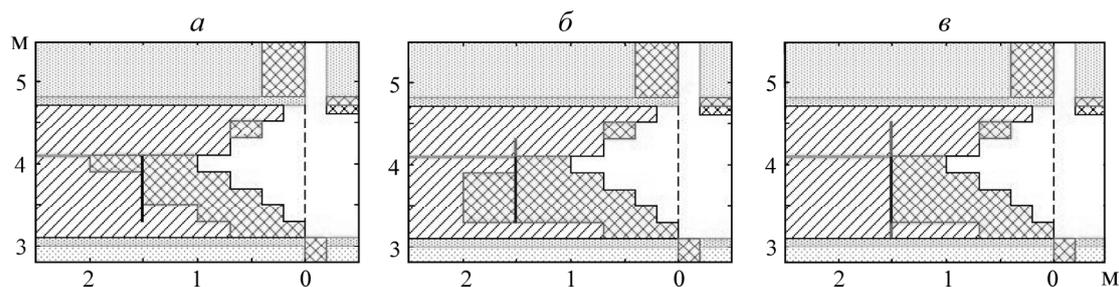


Рис. 6. Схемы разрушения пласта с трещиной впереди забоя лавы: *а* — трещина без газа; *б* — трещина с давлением газа 2 МПа; *в* — с давлением газа 3 МПа

ВЫВОДЫ

Расчетами геомеханического состояния массива в окрестности очистного забоя при вторичных посадках кровли на глубине 360 и 550 м показано, что разрушение забое лавы может происходить в форме отжима пласта и образования зон трещиноватости.

В зоне опорного давления лавы образуются ориентированные трещины, практически параллельные забою. На глубине 550 м в зависимости от давления газа трещины могут удлиняться в направлении только кровли или одновременно в направлении кровли и почвы пласта. Возникающие трещины формируют потенциально выбросоопасную ситуацию в лаве на глубине разработки 550 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. IV // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
2. Курленя М. В., Миренков В. Е., Красновский А. А. Напряженно-деформированное состояние горных пород вокруг выработки при переменном модуле Юнга // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 92–99.
3. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 46–52.
4. Серяков В. М. О деформировании и разрушении вмещающего массива при отработке пластовых месторождений // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: сб. тр. II Рос.-Кит. науч. конф. 02–05 июля 2012 г. — Новосибирск, 2012. — С. 96–101.
5. Еременко А. А., Серяков В. М., Гахова Л. Р. Геомеханическое обоснование параметров и способа создания демпферного слоя в окрестности выработки для снижения уровня горного давления // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 61–70.
6. Христианович С. А., Салганик Р. Л. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса // Препр. № 152. — М.: Институт проблем механики АН СССР, 1980. — С. 33–34.
7. Ставрогин А. Н. Исследование предельных состояний и деформации горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1969. — № 12. — С. 54–69.
8. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
9. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А., Савельев В. Н., Султанов У. С. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. — М.: Наука, 1980. — С. 78–85.
10. Veksler Ju., Scheerer H. J. Numerische Modellierung der Bruchvorgänge zwischen Rissen, Glückauf-Forschungshefte, 2002, Vol. 63, No. 2. — P. 51–56.
11. Петухов И. М., Линьков А. М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. — М.: Недра, 1978. — С. 62–91.
12. Каркашадзе Г. Г., Сластунов С. В., Ермак Г. П., Мазаник Е. В. Интенсификация дегазации угольного пласта на основе учета его геомеханического состояния в условиях нестационарных механических и сорбционных деформаций // Уголь. — 2015. — № 11. — С. 62–65.

Поступила в редакцию 11/IV 2016