

В.В. Фомичев, В.А. Соцков, А.С. Гусев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПИ ШТРЕКА ПРИ ЕГО НАДРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЛОИСТОГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Исследовано влияние очистных работ на дренажный штрек по вышележащему пласту. Выявлены закономерности распределения напряжений в условиях надработки подготовительной выработки, позволяющие внести изменения в используемую систему крепления, для повышения эффективности поддержания выработки.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ НЕСУЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ КРІПЛЕННЯ ШТРЕКУ ПРИ ЙОГО НАДПРАЦЮВАННІ В УМОВАХ ДРІБНОШАРУВАТОГО ПОРОДНОГО МАСИВУ

Досліджено вплив очисних робіт на дренажний штрек по верхньому пласту. Виявлені закономірності розподілу напружень в умовах надпрацювання підготовчої виробки, що дозволяють внести зміни в використовувану систему кріплення, для підвищення ефективності підтримки виробки.

DETERMINE OF CHANGES OF THE BEARING CHARACTERISTICS ELEMENTS OF DRIFT SUPPORT DURING ITS UNDERMINING IN CONDITIONS OF FINE-GRAINED ROCK MASSIF

The influence of extracting works on the overlying layers to drainage drift is investigated. The regularities of the stresses distribution in overworking conditions for development working allowing amend used fastening system to improve the efficiency of working support is identified.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Уголь, как энергетический ресурс, по своим характеристикам существенно отличается от нефти и природного газа. По объемам мировых запасов уголь превосходит все остальные виды ископаемого топлива. Так, коэффициент кратности запасов для угля (отношение оставшихся запасов к годовой добыче) в настоящее время составляет 122 года. Запасы каменного

угля в Украине, которые составляют около 33873 млн т – это 3,9% мировых запасов. В прошлом году было добыто 85,9 млн тонн угля, и по этому показателю Украина занимает 12-е место в мире. Добыча в Украине ныне ведется в 160 шахтах.

ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» – крупнейшее угледобывающее предприятие Украины. В состав объединения входят 10 шахт, а также предприятия транспортной и производственной инфраструктуры. «ДТЭК

Павлоградуголь» ведет добычу угля на территории Павлоградско-Петропавловского угленосного района Западного Донбасса. Предприятие осуществляет добычу энергетического и коксующегося углей, при этом основной объем приходится на энергетические угли. Промышленные запасы «ДТЭК Павлоградугля» составляют 699,2 млн т, что при существующем уровне добычи представляет обеспеченность углем на срок 56 лет.

Согласно годовому отчету компании «ДТЭК» за 2012 г., объем добычи угля составил 39,7 млн т. По сравнению с 2011 г. объем добычи увеличился до 65,4%. Такой значительный рост во многом обусловлен присоединением к компании новых угледобывающих предприятий в Украине и России, а также стабильным ростом годовых показателей добычи угля на предприятиях «ДТЭК Павлоградуголь» и «ДТЭК Шахта Комсомolec Донбасса» (на 10,3 и 5,8% соответственно). При этом «ДТЭК Павлоградуголь» за год достиг рекордной добычи – 17 млн т [1]. Тем не менее, согласно долгосрочной стратегии компании до 2030 г. объем добычи угля должен достигнуть 50 млн т [2].

Для достижения необходимых темпов роста добычи внедряется комплексная программа модернизации оборудования и технологическое совершенствование производственных процессов. Основным технологическим требованием является увеличение длины лавы и выемочного столба, что способствует интенсификации работ и снижению издержек на концевые операции. Данный подход отлично зарекомендовал себя на производстве, однако сопряжен с целым рядом трудностей. В первую очередь необходимо понимать, что увеличение объемов и площади извлекаемого угля способствует увеличению влияния горного давления. В связи с увеличением объемов зависающих консолей в кровле происходит рост нагрузки на механизированную крепь, что приводит к частым случаям посадки крепи на жесткую базу. Помимо проблем непосредственной добычи

угля происходит увеличение протяженности подготовительных выработок. С увеличением протяженности выработок соответственно увеличивается и влияние горного давления на крепежные системы. В результате ранее применявшиеся схемы крепления становятся неэффективными. Для решения подобных проблем необходим более гибкий подход к определению рациональных параметров крепи, которая бы учитывала особенности породного массива, производственные процессы и другие факторы, влияющие на устойчивость выработок.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В результате анализа современных подходов к определению рациональных параметров средств крепления выработок определена необходимость проведения дополнительных исследований. Для этого была разработана методика реализации вычислительного эксперимента на базе метода конечных элементов. Данный подход позволяет построить адекватную пространственную модель углевмещающего породного массива с учетом всех физико-механических свойств пород, смоделировать сеть подготовительных и выемочных выработок с используемыми системами крепления.

В статье рассмотрены результаты использования данного подхода на примере шахты «Самарская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» при отработке 547-й лавой пласта C_5 . Особенностью данного участка является проведение дренажного штрека на глубине 8 – 9 м под угольным пластом, для снятия сильного водопритока в лаву. Учитывалось влияние зон шарнирно-блокового сдвижения, образованных вследствие предварительной отработки двух соседних лав. В результате получена модель (рис.1, а), которая позволила максимально адекватно определить зоны опорного давления, а также области распределения повышенных напряжений в массиве.

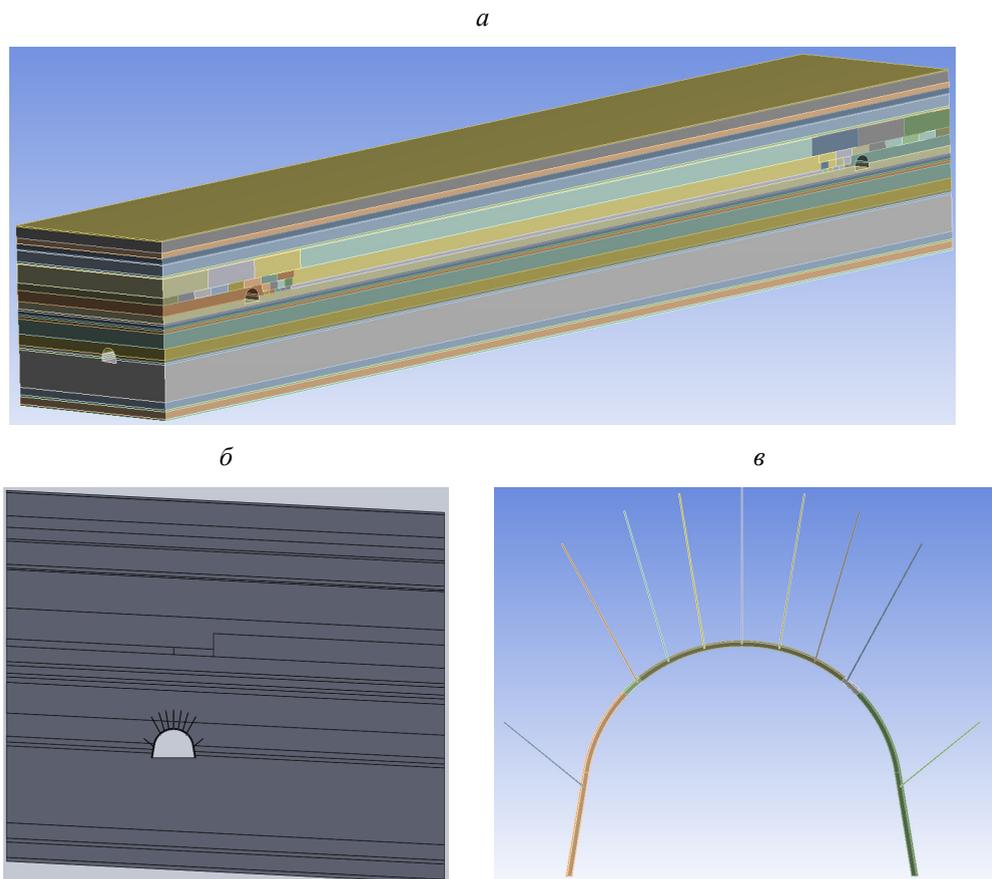


Рис. 1. Пространственная модель вычислительного эксперимента: а – изометрия; б – поперечное сечение; в – крепежная система дренажного штрека

В данном случае выемочные выработки подвергаются значительному техногенному воздействию двух факторов: влиянию проседания кровли в выработанное пространство отработанной лавы; влиянию зоны опорного давления вокруг приближающегося очистного забоя. Повторно используемые выработки широко применяются на шахтах Западного Донбасса благодаря чему достигается значительная экономия времени и финансов. Однако использование данной технологии сопряжено со сложностями поддержания выработок в условиях слабых вмещающих пород Западного Донбасса.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Рассматриваемая модель состоит из 25 породных слоев, при этом высота модели составляет 48,2 м. Мощность и физико-механические свойства каждого слоя полностью соответствуют геологическому прогнозу для 547-й лавы. Ширина модели 290 м, что включает в себя непосредственно лаву (230 м), выемочные штреки, а также ранее отработанные лавы по 25 м с каждой стороны. В кровле над отработанными лавами, а также вокруг выемочных выработок моделируется зона шарнирно-блокового сдвижения с разбиением пород-

ных слоев на блоки с различными размерами. На глубине 9 м от угольного пласта и на удалении 18 м от переднего края модели проведен дренажный штрек. Согласно паспорта крепления дренажного штрека была смоделирована рамная и анкерная крепи (рис. 1, в). Глубина модели составила 55 м. Механизированный комплекс моделировался в виде сплошного прямоугольного блока шириной 5 м и высотой 1 м. Выработанное пространство заполнено обрушенными породами, смоделированными в виде сплошного блока с прочностными характеристиками, соответствующими разрушенному горному массиву.

В ходе проведения вычислительного эксперимента были выполнены расчеты для различного положения очистного забоя относительно дренажного штрека. В результате получены эпюры интенсивности σ , горизонтальных σ_x и вертикальных

напряжений σ_y . В статье приведен только минимальный набор эпюр, необходимый для анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа распределения напряжений в горном массиве рассмотрим эпюры интенсивности σ и вертикальных напряжений σ_y для последнего этапа расчета, когда очистной забой находится непосредственно над дренажным штреком (рис. 2). Эпюры предыдущих этапов расчетов не представлены в связи с тем, что отличия в распределении напряжений на границах модели не превышают 5 – 7%. Это подтверждает, что при построении размеры модели обоснованы правильно, вследствие чего исключена возможность искажения результатов.

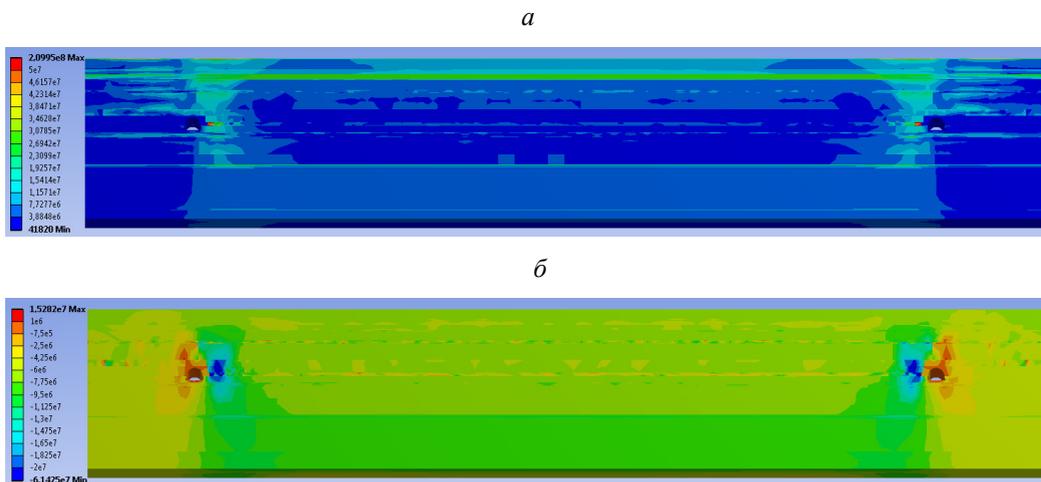


Рис. 2. Распределение напряжений в горном массиве: а – эпюра интенсивности σ ; б – эпюра вертикальных напряжений σ_y

На рис. 2, а представлена эпюра интенсивности напряжений σ . Распределение напряжений в окрестности выемочных выработок происходит достаточно симметрично. Это обстоятельство можно считать

вполне объективным и естественным, учитывая одинаковые условия расположения выработок. Данное обстоятельство позволяет использовать только одну сторону модели для детального анализа ситуации в

окрестности выработки.

В боку выработки со стороны залегания неотработанного угля образуется зона опорного давления (см. рис. 2, *а*). Приведенные напряжения находятся в диапазоне 15 – 20 МПа. Размеры данной области не ограничиваются только окрестностями выработки, а распространяются на значительное расстояние в кровлю и почву угольного пласта. При удалении от выработки также происходит увеличение ширины области. В общей сложности зона опорного давления занимает 37 – 40 м по высоте и 5 – 10 м по ширине. Распространению повышенных напряжений способствует зона шарнирно-блокового сдвижения моделируемая вокруг выработки. Влияние трещиноватости массива на распределение напряжений показано в работе [3].

Эпюра вертикальных напряжений σ_y (см. рис. 2, *б*) только подтверждает представленные ранее результаты. Максимальная концентрация сжимающих напряжений образуется в боку выработок со стороны оставшегося угольного пласта. Напряжения здесь превышают 20 МПа при разме-

рах области 6 – 8 м по ширине и 8 – 10 м по высоте. На большем удалении от выработки происходит снижение напряжений до 10 МПа, которые распространяются на расстояние до 20 м в глубину массива. При этом в кровле выработки образуется область растягивающих напряжений 1 – 3 МПа, которая распространяется на высоту до 5 м и ширину до 3 м. Это связано с просадкой основной кровли отработанного угольного пласта в выработанное пространство, в результате чего образуется небольшая область разгрузки в местах разломов породы и образования магистральных трещин.

Таким образом, исходя из полученной картины распределения напряжений в окрестности выработки, наиболее нагруженными сечениями в поперечной проекции модели являются сечения, примыкающие к зоне блочного моделирования и проходящие со стороны отработываемой лавы. Именно в этих сечениях, представленных на рис. 3, будут определены условия влияния структуры модели на деформационное состояние контура дренажного штрека.

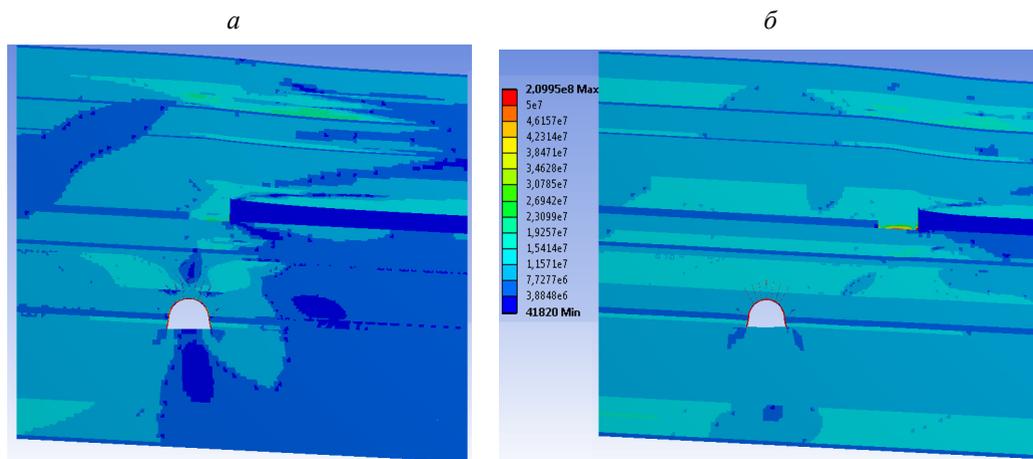


Рис. 3. Эпюры интенсивности напряжений σ поперечного сечения модели при разном положении очистного забоя: *а* – над дренажным штреком; *б* – 14 м до дренажного штрека

Как наиболее характерные из полученных результатов для проведения сравнительного анализа выбраны варианты: при расположении забоя над монтажным штреком (рис. 3, а) и на расстоянии 14 м до штрека (рис. 3, б).

Представленные эпюры демонстрируют характер перераспределения приведенных напряжений в горном массиве при приближении очистного забоя к монтажному штреку. На начальном этапе (см. рис. 3, б) напряжения в массиве вокруг дренажного штрека имеют малый градиент и практически постоянны в пределах отдельного породного слоя. При достижении лавы плоскости вертикальной симметрии дренажного штрека (см. рис. 3, а) вокруг него формируются зоны концентрации напряжений и разгрузки. При этом следует учесть, что расчет проводился в упруго-пластической постановке. В связи с этим

на данных эпюрах уже был пройден пик концентрации напряжений и теперь происходит снижение напряжений при увеличении деформаций.

В совокупности эпюры интенсивности напряжений σ , представленные на рис. 3, показывают как происходит перераспределение напряжений путем снижения их в кровле очистного забоя при прохождении дренажного штрека с одновременным переходом в запредельное состояние пород, его окружающих. То есть, прохождение лавы приводит к резкому росту деформаций в кровле и почве дренажного штрека, но при этом обеспечивает достаточную устойчивость пород в боках выработки. Исходя из этого основным критерием обеспечения эксплуатационных характеристик рассматриваемой выработки становится рост полных деформаций ее кровли и почвы.

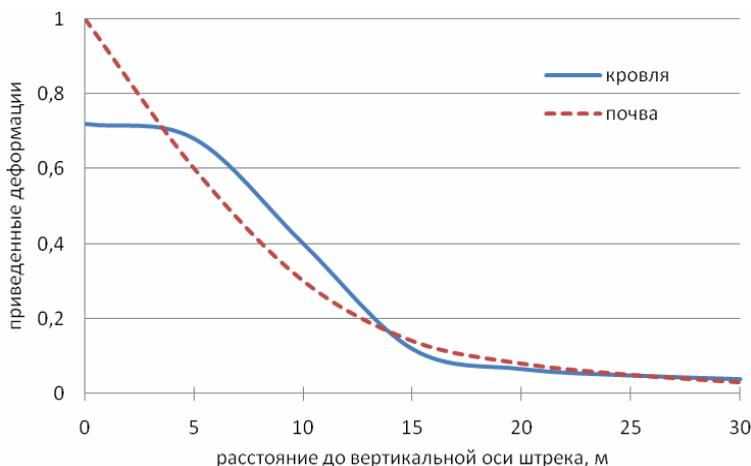


Рис. 4. График полных приведенных деформаций свода кровли дренажного штрека при подвигании очистного забоя

Графики, представленные на рис. 4, позволяют оценить поведение кровли и почвы выработки при приближении очистного забоя к вертикальной оси дренажного штрека. Как видно, до 14 м рост деформаций кровли и почвы имеет практически линейный характер. При этом динамика

роста является незначительной, что позволяет говорить о низком уровне влияния лавы на штрек. С 14 до 7 м наблюдается стремительный рост деформаций, что очевидно указывает на возрастающее влияние очистного забоя. В дальнейшем увеличение деформаций почвы продолжается в

том же темпе, что указывает на потерю несущей способности пород, ее образующих. А для кровли после 7 м деформации стабилизируются, что вероятнее всего следует связать с компенсацией горного давления.

Для аналитического описания представленных зависимостей введем понятие показателя взаимодействия выработок R (взаимное влияние очистного забоя и дренажного штрека). При описании воспользуемся функцией, устанавливающей зависимости между геометрическими и механическими характеристиками процесса влияния положения лавы на деформирование кровли выработки. Причем, эталонным качественным показателем принимаются графики деформаций представленные на рис. 4. В обобщенном виде описание приведенного показателя взаимодействия выработок выглядит следующим образом

$$R = f(R_v, R_h, E_i, \mathcal{H}), \quad (1)$$

где R_v – радиус окружности, описанной вокруг контура выработки;

R_h – радиус-расстояние от центра дренажного штрека по плоскости лавы;

E_i – усредненный модуль упругости слоистого горного массива;

\mathcal{H} – горное давление.

Получена зависимость, позволяющая спрогнозировать поведение контура дренажного штрека при его надработке в слоистом горном массиве, образованном породами с низкими, относительно угля, прочностными характеристиками.

Расположение очистного забоя над выработкой способствует появлению характерной области повышенных напряжений в промежуточных слоях, разделяющих угольный пласт и штрек. При приближении очистного забоя зоны опорного давления вокруг лавы и в боках выработки соединяются в единую область с концентрацией напряжений значительно превышающей предел прочности материалов. Размеры области достигают 10 м по высоте и 12 – 15 м по ширине, напряжения в диапазоне 15 – 22 МПа. Учитывая характеристики пород Западного Донбасса, такая концентрация напряжений приводит к образованию систем трещин и разупрочнения слоев. Одновременно в почве выработанного пространства происходит снижение концентрации напряжения до минимальных значений. Данные процессы провоцируют значительное увеличение нагрузки на систему крепления дренажного штрека [4].

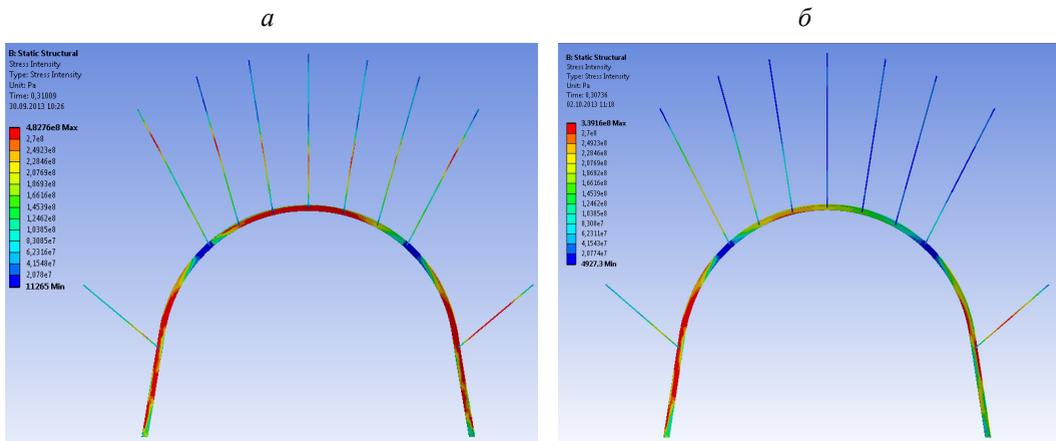


Рис. 5. Эпюры интенсивности σ системы крепления дренажного штрека при разном положении очистного забоя: а – над выработкой; б – 14 м до выработки

Аналогично породному массиву для анализа состояния крепежной системы используем эпюры интенсивности σ при различном расположении очистного забоя. При расстоянии 14 м от лавы до выработки (рис. 5, б) максимальные концентрации напряжений сосредоточены в левой стойке рамы. Напряжения достигают 270 МПа, что является пределом текучести используемой стали. В то же время правая стойка крепи нагружена значительно слабее. Напряжения изменяются по всей высоте стойки в широком диапазоне 120 – 200 МПа. В верхняке рамы наибольшие напряжения локализуются левее центральной оси в области длиной не более 1 м, при этом не превышая 220 МПа. В остальной части верхняка напряжения составляют 120 – 140 МПа. Анкерное крепление нагружено также неравномерно. Максимальные концентрации напряжений распределяются в правом боковом анкере, особенно в центральной части, где, очевидно, происходит защемление и деформация стальной арматуры. Анкера, расположенные в кровле выработки, нагружены достаточно слабо, напряжения не превышают 60 МПа. Исключением являются два крайних анкера слева, с напряжением до 160 МПа.

Распределение напряжений при положении забоя над дренажным штреком (см. рис. 5, а) существенно отличается от предыдущего. Практически 90% рамной крепи подвержено напряжениям, равным или превышающим предел текучести стали, что свидетельствует о значительном увеличении давления породы на крепь. В результате происходит срабатывание замков податливости, а также деформирование профиля рамной крепи сразу в нескольких местах. Анкерное крепление, соответственно, также нагружено сильнее. Центральная часть всего ряда анкеров кровли защемлена вследствие сдвижения породного слоя над выработкой.

Рост напряжений в анкерах (см. рис. 4, а) происходит за счет изгиба породных слоев образующих кровлю дренажного

штрека. На это указывает геометрическое расположение зон повышенных деформаций в теле анкера. Фактически сопротивление анкеров опусканию кровли выработки достигается за счет наличия поперечных деформаций, возникающих на границе породных слоев, которые имеют различные механические характеристики. Кроме того, для центральной группы анкеров зоны концентрации напряжений смещены в сторону контура дренажного штрека, что указывает на влияние области разгрузки горного массива. В результате эффективность применения трех центральных анкеров в момент максимального нагружения крепи выработки становится минимальной. Это приводит к росту зон повышенных напряжений в верхнем сегменте рамной крепи. Таким образом, для анализа эффективности установки анкеров можно принять комбинированный показатель изменения приведенных напряжений в анкере и прилегающем к нему участке рамы.

Для обеспечения поиска оптимальных параметров установки анкера в рамках рассматриваемой задачи было получено следующее условие

$$K_{\sigma} = \frac{2,43b_r \sigma_r - l_a \cos(\alpha) \sigma_a}{\sigma_{max}}, \quad (2)$$

где σ_r , σ_a , σ_{max} – максимальные интенсивности напряжений, соответственно, в раме, анкере и всей крепежной системе;

b_r , b – расстояние от вертикальной оси до устья шпура анкера и ширина выработки по почве;

l_a , l – расстояние от устья шпура до центра зоны максимальных напряжений и длина анкера;

α – угол установки анкера относительно горизонта.

При показателях K_{σ} менее |0,2| установка анкера признается эффективной, при значении этого параметра до |0,5| – анкер установлен приемлемо, а уже выше – его размещение не обеспечивает достаточной

несущей способности.

Таким образом, в рамках рассматриваемого примера только боковые анкера установлены с соблюдением условия приемлемой эффективности работы. Все семь анкеров в кровле дренажного штрека обладают низкой эффективностью, а три центральных вообще не обеспечивают приемлемой несущей способности.

В целом, результаты проведенного моделирования хорошо согласуются с натурными наблюдениями, выполненными на шахте «Самарская». Выявленные закономерности как в качественном, так и в количественном представлении отвечают реальному изменению высоты дренажного штрека, происходящему при его надработке в данных горно-геологических условиях.

ВЫВОДЫ

Рассмотренная крепежная система не обеспечивает устойчивости штрека в усло-

виях его надработки. При этом влияние прохождения лавы на его состояние имеет трехфазный нелинейный характер, определяемый картиной деформирования боков рассматриваемой выработки. Полученные результаты позволяют с высокой точностью оценить эффективность работы отдельных элементов крепи дренажного штрека и выявить ее проблемные места. Авторами выявлены закономерности распределения напряжений в условиях надработки подготовительной выработки, позволяющие внести изменения в используемую систему крепления, для повышения эффективности поддержания выработки. Определены граничные условия эффективного размещения анкеров для обеспечения устойчивости выработки, находящейся в зоне влияния повышенного горного давления, вызванного движением очистного забоя.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергия в действии: отчет о НИР (заключ.) / ДТЭК. – Донецк, 2012 – 237 с.
<http://www.dtek.com/library/file/annual-report-2012-ru.pdf> [Электронный ресурс]
2. <http://www.dtek.com/library/file/dtek-strategy-20-rus-1.pdf> [Электронный ресурс]
3. Фомичев В.В. Особенности моделирования трещиноватости пород горного массива примыкающих к контуру временной выработки / В.В. Фомичев, В.А. Соцков, А.И. Скитенко // Сб. науч. тр. Sworld. – Вып. 3, Т. 14. – Иваново: МАРКОВА АД. – 2013 – 93 с.
4. Sotskov V. Investigation of the rock massif stress strain state in conditions of the drainage drift overworking

/ V. Sotskov, I. Saleev // *Mining of mineral deposits.* – Netherlands: CRC Press/Balkema, 2013. – P. 197 – 201.

ОБ АВТОРАХ

Фомичев Вадим Владимирович – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Соцков Вадим Александрович – аспирант кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Гусев Александр Станиславович – директор ПСП «Шахтоуправление «Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».

