

УДК 622.831.3.02:539.2.8

Моделирование геомеханической ситуации при проведении квершлага в зоне геологического нарушения

Приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород в окрестности откаточного квершлага, проводимого по пласту c_{10}^B при пересечении геологического нарушения Богдановский сброс. Индикатором состояния породного массива приняты размеры зон разрушений вокруг выработки, определяемые на основе критерия Хока–Брауна с использованием широко применяемой в мировой практике концепции геологического индекса прочности. Показано, что при входе забоя квершлага в зону сброса нагрузка на крепь возрастает более чем в 3 раза. Предложена конструкция специальной «двойной» крепи.

Ключевые слова: геомеханические процессы, породный массив, напряженно-деформированное состояние, критерий прочности, нагрузка на крепь.

Контактная информация: sdyzhkova@yandex.ua

Эффективность внедрения на угольных шахтах Украины новых технических решений во многом зависит от их своевременного и всестороннего обоснования, в частности с точки зрения геомеханических процессов, которые происходят в породном массиве во время выполнения горных работ. Инструментальные измерения и прогностическое моделирование состояния массива – необходимые этапы инновационных проектов.

В целях улучшения экономических показателей шахты «Самарская» шахтоуправления «Терновское» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь» предусмотрено перераспределение запасов пласта c_{10}^B (блок № 2) между шахтами «Западно-Донбасская» и «Самарская». Первый этап подготовки пласта к отработке – проведение по пласту c_{10}^B откаточного и конвейерного квершлагов. Откаточный квершлаг начали проводить в 2010 г. После проведения 1160 м работы приостановили, выработку изолировали перемычкой, поскольку было необходимо пересечь крупное геологическое нарушение – Богдановский сброс. Для выполнения производственного задания шахтоуправление разработало специальный проект проведения квершлага по пласту c_{10}^B , основанный на данных большого комплекса изыскательских работ.

Постановка проблемы. По данным геологической службы шахтоуправления, Богдановский сброс имеет северо-западное простирание, совпадающее с простиранием толщи нижнекарбонных пород (азимут простирания сместителя 340° , угол падения 45° – 60° , амплитуда смещения 35–320 м). Нарушенные



Е. А. СДВИЖКОВА,
доктор техн. наук
(Национальный горный институт)



С. Н. ГАПЕЕВ,
доктор техн. наук
(Национальный горный университет)



М. В. БАРАБАШ,
инженер
(ООО «ДТЭК ЭНЕРГО»)



С. А. ВОРОНИН,
инженер
(ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь»)



В. Г. СНИГУР,
канд. техн. наук
(ПСП «Шахтоуправление «Терновское»
ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь»)

зоны шириной 85 м, представленные аргиллитами, алевролитами, песчаниками с нарушенной структурой, разбиты трещинами разного направления, сильно перемяты или раздроблены, с зеркалами скольжения.

Проведение откаточного квершлага в зоне геологического нарушения отличалось такими рисками: нарушенностью породного массива; низкими прочностными свойствами пород; изменчивостью напряженно-деформированного состояния массива; высокой водопроницаемостью пород; возможностью большого притока воды и прорыва в выработку разрыхленной увлажненной горной массы. В этих сложных условиях была запланирована эксплуатация выработки в течение 15 лет. Поэтому, чтобы обеспечить длительное безопасное функционирование и сохранение ее устойчивости, требовался достоверный прогноз геомеханических процессов, которые будут протекать в окрестности выработки на разных этапах ее проведения и эксплуатации.

Один из элементов прогноза – математическое моделирование состояний массива, отвечающих реальным ситуациям проведения выработки в сложных горно-геологических условиях. Современные численные методы геомеханики позволяют моделировать напряженно-деформированное состояние области массива любой геометрии с учетом анизотропии свойств пород и структурно-текстурных неоднородностей. Авторы работы [1, 2] показали также возможности численной имитации развития горных работ, в частности последовательного продвижения очистного забоя лавы в шахтах Западного Донбасса.

Для сформулированной выше задачи важно моделирование как развития проходческих работ, так и зон массива с разной степенью структурной неоднородности. Основное внимание должно быть сосредоточено на моделировании увлажненной дезинтегрированной горной массы непосредственно в зоне геологического нарушения, где следует ожидать больших смещений пород и повышенной нагрузки на крепь выработки. При этом адекватность деформационных моделей, лежащих в основе геомеханического прогноза, должна обеспечиваться параллельным мониторингом состояния выработки по мере ее проведения, сравнением результатов моделирования и

данных инструментальных наблюдений с последующей корректировкой прогностической модели.

Цель исследования – оценка изменений характеристик напряженно-деформированного состояния пород в окрестности выработки по мере продвижения забоя в зонах породного массива со структурными особенностями, в частности в зоне геологического нарушения. Индикатором состояния породного массива могут быть размеры зоны разрушений (зоны неупругих деформаций) вокруг выработки, которые определяют нагрузку на крепь и степень податливости. Указанные параметры – главные практические результаты моделирования и основа проектирования крепи, а также разработки дополнительных мероприятий по повышению устойчивости выработки.

Основные материалы исследования. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива в окрестности откаточного квершлага, проводимого по пласту c_{10}^B , с учетом вхождения выработки в опасную зону тектонического нарушения, выполнен численно с использованием метода конечных элементов, реализованного в лицензионном программном комплексе PHASE2 компании Rockscience. Моделирование осуществлено в три этапа:

- **первый этап** – моделируется откаточный квершлаг как протяженная полость в трехмерной области породного массива вне зоны влияния геологического нарушения. Выполняется «калибровка» модели для исследуемых горно-геологических условий в соответствии с данными визуальных и инструментальных наблюдений за состоянием выработки. Кроме того, осуществляется переход к двумерным расчетным схемам, моделирующим площадь продольного и поперечного сечений протяженной выработки. Для этого используется так называемый коэффициент «пригрузки». Он вычисляется как отношение максимальных напряжений вблизи забоя, полученных в рамках трехмерной и двумерной расчетных схем. Для этого использован лицензионный программный комплекс SOLIDWORKS;

- **второй этап** – имитируется процесс проведения откаточного квершлага, т. е. последовательное движение забоя до подхода к тектоническому нарушению. Рассматривается

площадь продольного сечения протяженной выработки с учетом дополнительных коэффициентов «пригрузки». На основе двумерной модели площади продольного сечения квершлага моделируется продвижение забоя путем пошагового изменения граничных условий: увеличения полости и закрепления контура выработки позади забоя. На этом этапе модель адаптируют к реальным условиям;

- **третий этап** – моделируется вхождение забоя выработки в опасную зону. Для этого используются обобщенные данные о размерах нарушенной зоны, о распространении опережающей трещиноватости и ее интенсивности, степени увлажнения пород и связанной с этим потери прочности.

На втором и третьем этапах последовательное продвижение забоя моделируется с помощью 125 стадий, на каждой из которых забой продвигается на 1 м, после чего выработка на предыдущем шаге закрепляется путем приложения равномерно распределенной нагрузки, имитирующей поддержание штрека крепью КШПУ. На каждой стадии определяются напряжения, деформации и перемещения пород в окрестности откаточного квершлага. Алгоритм вычислительной программы позволяет на каждой последующей стадии учесть деформации, реализованные на предыдущей стадии.

Наиболее информативный показатель состояния породного массива – размеры зоны неупругих деформаций (зоны разрушения) в окрестности изучаемого объекта. Эти зоны следует определять на основе теории прочности, наиболее реалистично отражающей процесс разрушения горной породы в данных условиях. В работе [3] показано, что для шахт Западного Донбасса хорошо апробирована широко используемая в мировой практике теория прочности Хока–Брауна [4]. Критерий прочности, разработанный Э. Хоком и Д. Брауном, определяет уровень предельных напряжений, реализация которых в массиве приводит к переходу пород в новое качественное состояние. В зависимости от вида пород это может быть либо хрупкое разрушение, либо необратимые пластические деформации. Предполагается, что в разрушении пород участвуют и напряжения сдвига, и напряжения отрыва. В классическом виде это условие разрушения описывается уравнением

$$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c [m_b (\sigma_3 / R_c) + s]^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, МПа;

R_c – среднее значение предела прочности на одноосное сжатие породных образцов, МПа;

m_b – безразмерная константа Хока–Брауна, учитывающая генезис и состояние (качество) породного массива;

s и a – безразмерные константы, получаемые при испытании пород в сложном напряженном состоянии.

Формула (1) позволяет учесть структурные отличия пород посредством так называемого геологического индекса прочности GSI (Geological Strength Index), учитывающего геологические особенности породного массива, в частности его структуру и наличие трещин ($5 \leq GSI \leq 100$). Значения геологического индекса прочности выбирают в соответствии с классификацией, разработанной Э. Хоком и Д. Брауном [4]. Численное значение GSI выбирают на основе визуального обследования пород в естественных условиях и данных, предоставленных геологической службой шахты.

Введение в расчет индекса GSI корректирует все механические характеристики пород в зависимости от структуры и степени нарушенности. С учетом индекса нарушенности константу m_b , определяющую генезис пород, корректируют следующим образом:

$$m_b = m_i \exp(GSI - 100/28). \quad (2)$$

Значения s и a (параметры аппроксимации огибающей кругов напряжений при испытании образцов) определяют в зависимости от геологической характеристики пород. Для породного массива, который авторы [4] характеризуют как массив «хорошего качества» ($GSI > 25$), эти параметры равны:

$$s = \exp(GSI - 100/9) \text{ при } a = 0,5, \quad (3)$$

для породного массива «плохого качества» ($GSI < 25$)

$$a = 0,65 - (GSI/200) \text{ при } s = 0. \quad (4)$$

Подготовка исходных данных для численного моделирования с использованием концепции геологического индекса прочности. Породы, вмещающие пласт c_{10}^B , представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками и

классифицируются как неустойчивые, а также весьма неустойчивые. Породы трещиноватые, склонны к размоканию, прочность на сжатие в необводненном состоянии не превышает 26 МПа. В соответствии с классификацией Хока и Брауна указанные породы следует отнести к породам «плохого качества» (Poor Quality Rock Mass), которые, тем не менее, в местах обнажения сохраняют связность и целостность, несмотря на присутствие двух или трех систем трещин.

Условно породы кровли и подошвы на протяжении большей части трассы рассматриваемой выработки можно классифицировать как блочно-нарушенные, исходя из этого им можно присвоить индекс $GSI = 30$. Это означает, что параметры, характеризующие переход пород в запредельное (пластическое) деформирование, пересчитываются по корреляционным зависимостям (2), (3) и, таким образом, они изменяются по сравнению с теми, которые получены для образцов пород.

Известно, что зоне геологического нарушения предшествует зона повышенной оперяющей трещиноватости. Граница этой зоны отделяет область безопасного ведения работ (ГБВГР) от области влияния нарушения. Зоны оперяющей трещиноватости введены в расчет-

ную схему задачи для отражения постепенного ухудшения геологической ситуации при движении забоя выработки к тектоническому нарушению. Механические свойства пород в этих зонах пересчитаны с учетом геологического индекса, равного 20, соответствующего сильно нарушенному, расслоившемуся массиву, пересеченному множеством трещин.

Непосредственно в зоне сброса породы, представленные аргиллитами, алевролитами и песчаниками, имеют существенно нарушенную структуру, разбиты трещинами разного направления с зеркалами скольжения, перемыты или раздроблены. С учетом структурных особенностей в зоне нарушения геологический индекс снижается до минимального значения ($GSI = 14$), соответствующего дезинтегрированной массе, сланцеватому массиву с очень слабым сцеплением, с отдельностями разной формы.

Расчетная схема, включающая три описанные области, характеризующиеся разной степенью структурной нарушенности, приведена на рис. 1. Отражена ситуация, когда забой выработки прошел через зону сброса и сопутствующую зону оперяющей трещиноватости.

С учетом того что откаточный квершлаг, проводимый по пласту C_{10}^B , пересекает Богда-

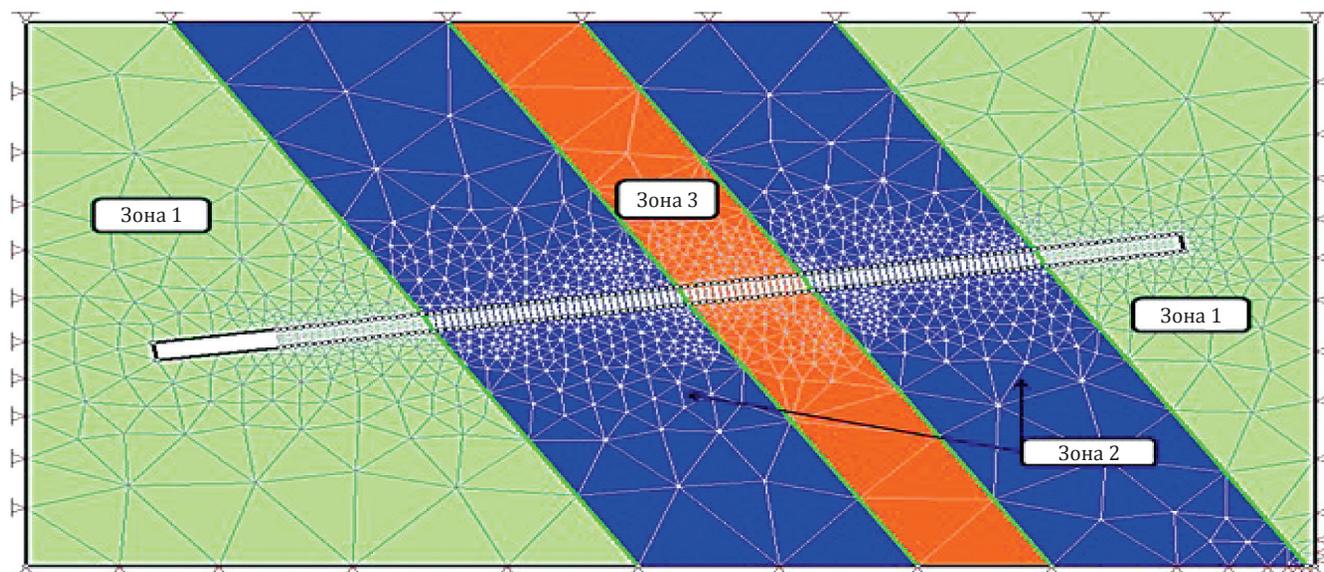


Рис. 1. Расчетная схема и конечно-элементная модель продольного сечения квершлага при пересечении зон породного массива: зона 1 – ненарушенные породы вне влияния сброса ($GSI = 30$); зона 2 – оперяющая трещиноватость ($GSI = 20$); зона 3 – перемытые, сильно трещиноватые породы ($GSI = 14$).

новский сброс на глубине $H = 170$ м, напряжение нетронутого массива составит $(\sigma_y)_0 = 4,25$ МПа при среднем удельном весе пород 25 кН/м³. В соответствии с нормативным документом [5] в районе геологического нарушения расчетную глубину следует умножить на коэффициент запаса K_z , равный $1,5$. Кроме того, исходное поле напряжений умножается на коэффициент пригрузки K_p , учитывающий переход от трехмерной расчетной схемы к двумерной. В данном случае из предварительных расчетов следует, что $K_p = 1,2$. Тогда расчетное значение исходного поля напряжений составит $(\sigma_y)_p = (\sigma_y)_0 K_z K_p$, т. е. $7,68$ МПа.

Физико-механические свойства пород и угля приняты для моделирования на основе данных геологической службы согласно прогнозируемому паспорту и геологическому описанию пород. В основном трасса квершлага проходит в слое алеволита с пределом прочности R_c , равным $25-26$ МПа. Коэффициент Пуассона в расчетах принимали равным $0,3$, модуль упругости $E = 1434$ МПа. В зоне опережающей трещиноватости и непосредственно в зоне сброса эти характеристики корректируются в соответствии с принятым значением геологического индекса GSI .

Результаты численного моделирования. На каждой стадии продвижения забоя выполняли оценку напряженно-деформированного состояния всей области, включающей исследуемую трассу откаточного квершлага пласта c_{10}^B .

В зоне 1 (рис. 2) высота области разрушенных пород вокруг выработки составляет $2,5-3$ м.

Нагрузка на крепь квершлага определяется как вес пород в области неупругих деформаций (разрушения), т. е.:

$$P = \gamma S_m, \quad (5)$$

где γ – удельный вес пород, кН/м³;

S_m – площадь области разрушения в кровле выработки, м².

Такой подход не противоречит концепции нормативного документа [5]. Хотя область разрушенных пород имеет параболическое очертание, с запасом прочности будем определять площадь этой области как площадь прямоугольника высотой h_p , где h_p – наибольший размер зоны разрушения в направлении, пер-

пендикулярном к напластованию, и основанием, равным ширине выработки B , м:

$$P = \gamma S = \gamma B h_p, \quad (6)$$

Нагрузка на крепь от веса пород в области разрушения высотой $h_p = 3$ м при ширине выработки $B = 4$ м составит $333,45$ кН/м. При установке рамной металлической крепи с шагом $0,8$ м получим нагрузку на одну раму крепи, равную 267 кН. Такое давление компенсируется установкой крепи КШПУ-11,7, рабочее сопротивление одной рамы которой составляет 270 кН. В таких условиях крепь как конструкция близка к исчерпанию рабочего сопротивления. Поэтому при поддержании квершлага

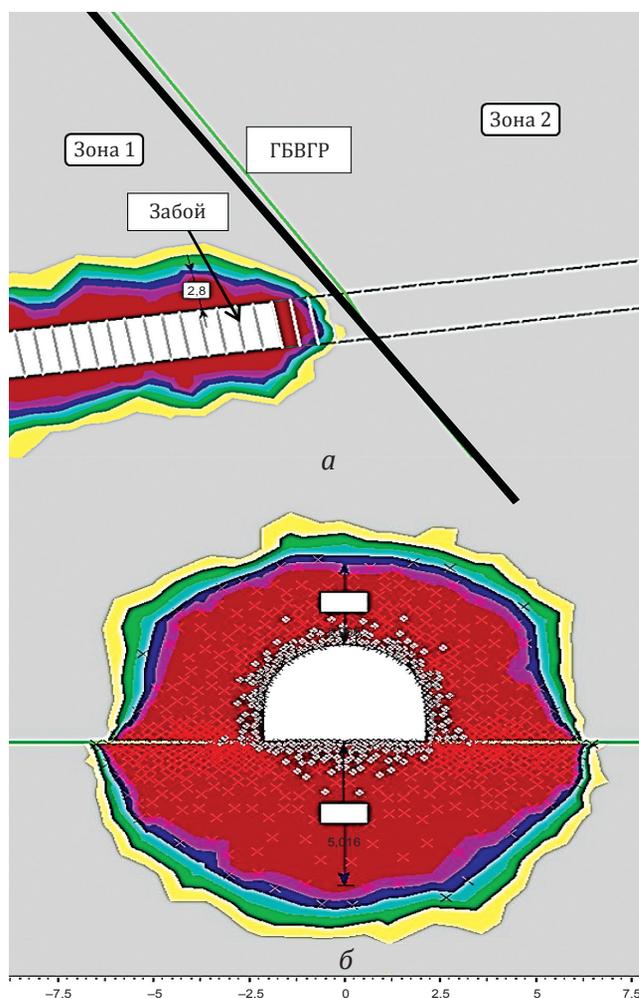


Рис. 2. Области разрушения вокруг квершлага до границы зоны влияния сброса: а и б – продольное и поперечное сечения выработки.

дополнительный запас прочности крепи обеспечивается установкой сталеполимерных анкеров.

При вхождении забоя в зону 2 (опереющей трещиноватости) размеры области разрушения возрастают и в кровле, и в подошве выработки до 3–4 м, за исключением участков вблизи границы всей моделируемой области, где на результаты влияют граничные условия. При дальнейшем продвижении забоя область разрушения в кровле достигает высоты 5,5–6,1 м (рис. 3). В результате нагрузка на крепь увеличивается до 678 кН/м. Для удержания такой массы пород необходима установка более двух рам крепи КШПУ на 1 м длины выработки. Кроме того, обширная область пластических деформаций в ее подошве свидетельствует о возможном интенсивном пучении пород.

Непосредственно в зоне сброса (зона 3) размеры области разрушенных пород в кровле и в подошве становятся еще более значительными, достигая в кровле сначала 8–9 м (рис. 4), затем, по мере дальнейшего продвижения забоя, распространяются на 10,2 м. Нагрузка на крепь, создаваемая весом пород в такой обширной зоне, составит 1133 кН/м. Для ее компенсации необходимы дополнительные мероприятия.

Одно из решений – применение «двойной» крепи, предусматривающее соединение в одну конструкцию крепей КШПУ-М 11,7 и КШПУ-М 15,1 (рис. 5). Пространство между двумя профилями СВП-27 заполняется бетоном марки не ниже М 200 (класс В15), причем защитный слой от верхней грани крепи КШПУ-М 15,1 составляет 150 мм, от нижней грани КШПУ-М 11,7 – 50 мм.

В работе [6] приведены расчеты изгибающих моментов в элементах комбинированной крепи.

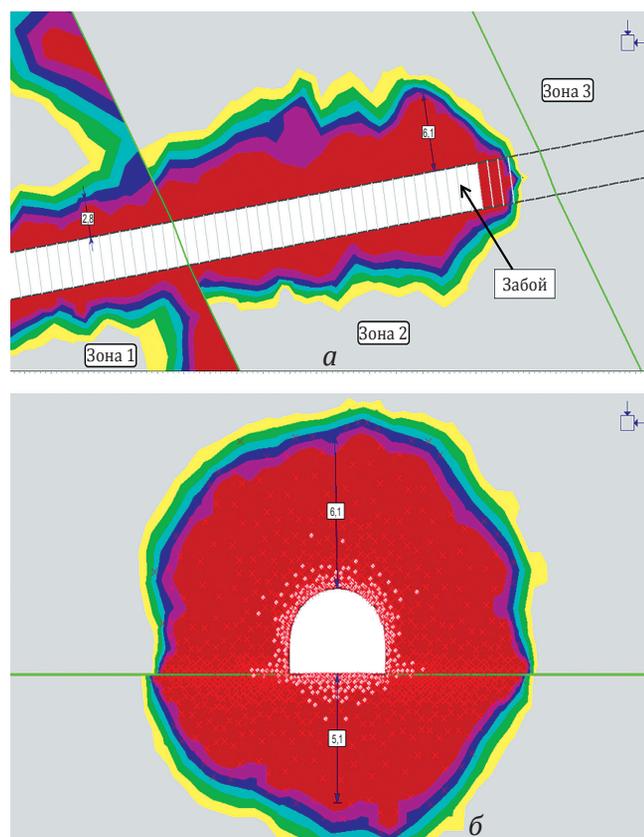


Рис. 3. Размеры (в метрах) области разрушенных пород при прохождении забоя квершлага зоны опереющей трещиноватости: а и б – продольное и поперечное сечения выработки.

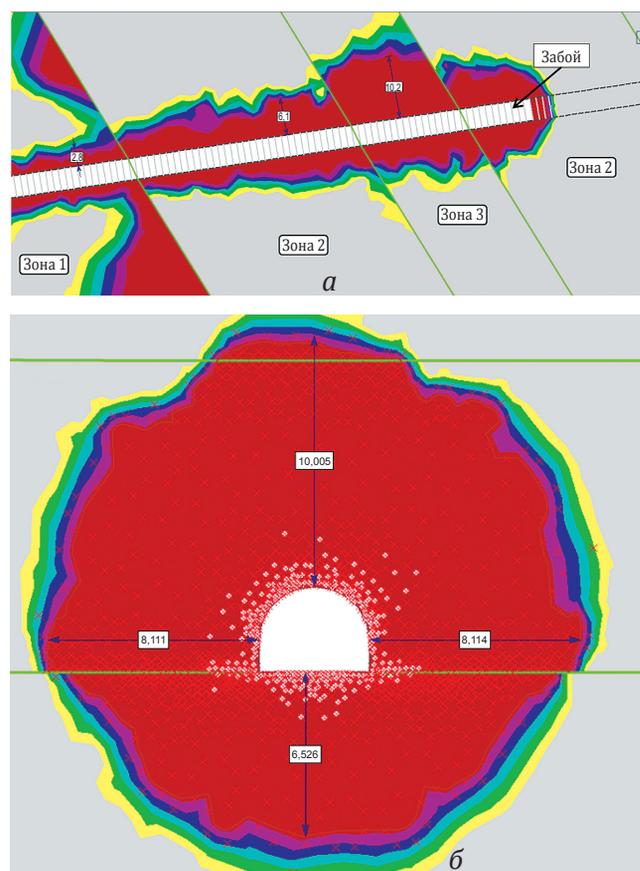


Рис. 4. Размеры (в метрах) области разрушенных пород при прохождении забоя квершлага непосредственно зоны сброса: а и б – продольное и поперечное сечения выработки.

Показано, что предельный изгибающий момент, при котором произойдет исчерпание несущей способности данной крепи, составит 211 кН·м, что в 7,4 раза больше, чем предельный изгибающий момент элементов крепи КШПУ-М 11,7. Таким образом, установка комбинированной крепи увеличивает несущую способность конструкции в 7,47 раза по сравнению с несущей способностью стандартной крепи КШПУ-М 11,7.

Погонная нагрузка P на крепь, равная 1133 кН/м, которая в результате моделирования наблюдается при вхождении забоя квершлага в зону сброса, распределяется по периметру крепи L и составляет $q = P/L = 107,2$ кН/м. Расчеты, выполненные методом конечных элементов в программном комплексе «SCAD-office» при такой распределенной нагрузке, показывают, что даже в наиболее опасном сечении, где криволинейная часть конструкции сопрягается с прямолинейными элементами (ножками крепи), изгибающий момент не превышает 50 % предельного момента сопротивления комбинированного профиля.

Таким образом, комбинированная крепь КШПУ-М 11,7–КШПУ-М 15,1 непосредственно в зоне сброса функционирует с запасом прочности не менее 2. Однако для исключения возможных рисков и большего повышения запаса прочности крепи рекомендуется установка комбинированной «двойной» крепи плотностью 1,5 рамы на 1 м. При этом следует принять во внимание, что значительный размер области пластических деформаций в подошве выработки обуславливает возможности интенсивного пучения пород. Поэтому необходимы дополнительные меры, направленные на борьбу с этим явлением.

Для рассматриваемых условий можно также рекомендовать применение арочной податливой крепи с обратным сводом (рис. 6). Увеличение радиуса кривизны обратного свода этого типа крепи, в сравнении с кольцевой крепью, позволяет уменьшить размеры подрывки в подошве для установки нижнего элемента (леж-

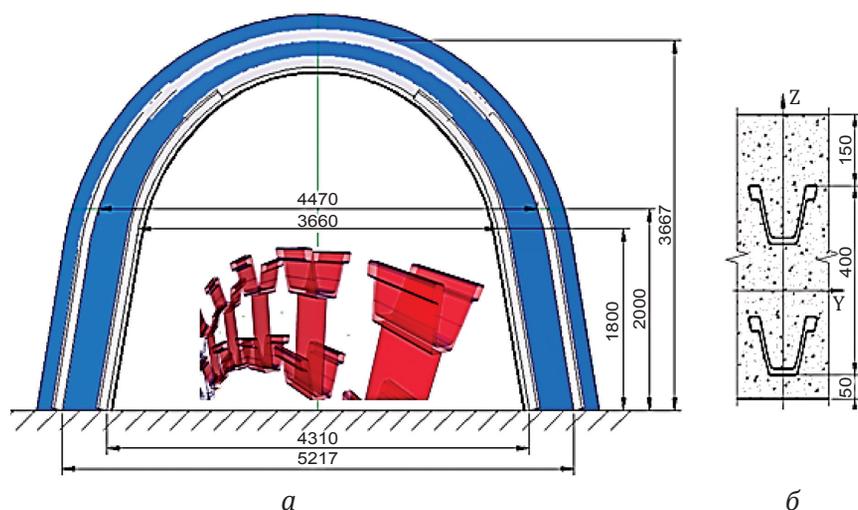


Рис. 5. Двойная крепь (а) и общий вид комбинированного удвоенного профиля СВР-27 (габариты 0,147×0,4 м) с бетонным заполнителем (б).

ня), за счет чего уменьшается объем ручной разработки пород. Кроме того, облегчается процесс установки рам. Эти факторы позволяют увеличить скорость сооружения выработки.

Проект проведения откаточного квершлага на шахте «Самарская» в опасной зоне тектонического нарушения Богдановский сброс успешно реализован. Положительный опыт его проведения подтвердил достоверность выполненных

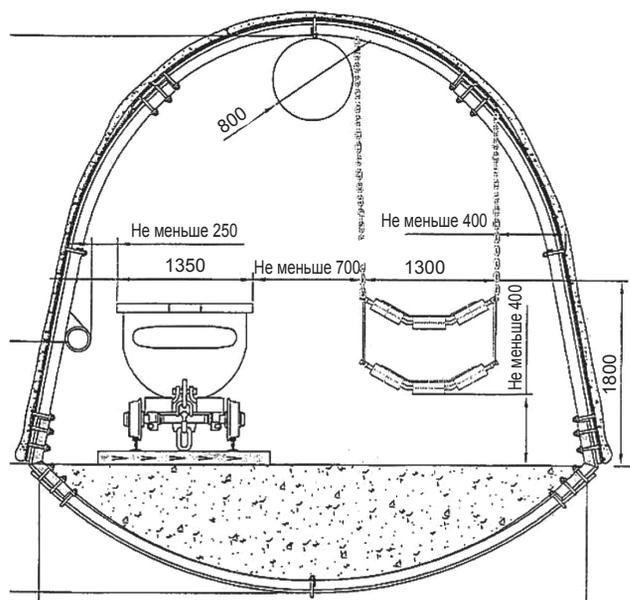


Рис. 6. Сечение выработки с крепью КШПУ с обратным сводом.

теоретических расчетов и сформулированных рекомендаций относительно обеспечения устойчивости данной выработки.

Выводы. Использование критерия прочности Хока–Брауна, адекватно отражающего процессы разрушения горных пород в условиях шахт Западного Донбасса, а также концепции геологического индекса в комплексе с эффективным методом конечных элементов дало возможность достоверно прогнозировать размеры зоны разрушения (неупругих деформаций) в окрестности квершлага, проводимого в зонах массива с разной степенью структурной неоднородности. Определение веса пород, заключенных в зоне разрушения, позволило прогнозировать нагрузку на крепь выработки в указанных зонах.

Численное моделирование последовательного продвижения забоя откаточного квершлага, проводимого по пласту c_{10}^B к зоне влияния тектонического нарушения Богдановский сброс, показало:

- до подхода к зоне опережающей трещиноватости штрек воспринимает давление, типичное для условий шахт Западного Донбасса, а именно: высота области неупругих деформаций (разрушения) в кровле составляет 3 м, что создает нагрузку 330 кН на 1 м длины выработки; такое давление компенсируется установкой крепи КШПУ-11,7 плотностью 1,25 рамы на 1 м длины выработки;

- при входе забоя в зону трещиноватости область разрушения в кровле выработки увеличивается до 6,1 м, создавая нагрузку на крепь, равную 678 кН/м. Такую нагрузку можно компенсировать повышением плотности установки стандартной крепи КШПУ и дополнительным анкерованием пород;

- непосредственно в зоне сброса область разрушения в кровле выработки увеличивается до 10,2 м, создавая нагрузку на крепь, равную 1133 кН/м. Такое значительное давление пород требует установки крепи большей несущей способности.

Вариантом повышения несущей способности крепи принята комбинированная крепь, предусматривающая соединение в одну конструкцию крепей КШПУ-М 11,7 и КШПУ-М 15,1, пространство между рамами которых заполнено бетоном. Ее несущая способность более чем в 7 раз превышает несущую способность стандартной крепи КШПУ-11,7.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается успешной реализацией проекта проведения откаточного квершлага по пласту на шахте «Самарская» в опасной зоне тектонического нарушения Богдановский сброс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sdvyzhkova O.* Support loading of assembly chamber in terms of Western Donbas plough longwall / *O. Sdvyzhkova, D. Babets, A. Smirnov // Scientific bulletin of National Mining University.* – 2014. – № 5. – P. 26–32.
2. *Sdvyzhkova O.* Determining the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall / *O. Sdvyzhkova, D. Babets, K. Kravchenko, A. Smirnov // Scientific bulletin of National Mining University.* – 2016. – № 2. – P. 34–42.
3. *Солодянкин А. В.* Оценка устойчивости протяженных выработок по величине смещений их контура / *А. В. Солодянкин, С. Н. Гапеев, А. В. Мартовицкий, В. В. Панченко // Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва.* – 2012. – № 1(9). – С. 86–93.
4. *Hoek E.* A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock mass characterization / *E. Hoek, D. Wood, S. Shah // Symp. Int. Soc. Rock Mech.:Eurock-92 (ed. J. A. Hudson).* – London: Brit. Geol. Soc., 1992. – P. 209–214.
5. *Подготовительные выработки на пологих пластах.* Выбор крепления, способов и средств охраны: СОУ 10.1.00185790.011:2007. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
6. *Шашенко А. Н.* Расчет предельной несущей способности и конструктивных параметров усиленной крепи на примере пересечения «Богдановского сброса» / *А. Н. Шашенко, Е. А. Сдвижкова, А. Е. Нечитайло // Форум гірників-2015, матеріали міжнарод. конф., 30 верес.* – 03 жовт. 2015. – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2015. – С. 96–104.