ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54:539.3

Н.В. Черданцев

ВЛИЯНИЕ АНКЕРНОЙ КРЕПИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНОГО МАССИВА, ВМЕЩАЮЩЕГО ОДИНОЧНУЮ ВЫРАБОТКУ

Важнейшей проблемой эффективной разработки угольных месторождений является прогноз следствий техногенного воздействия на массив горных пород (вывалы, потеря устойчивости, газодинамические проявления), которые в первую очередь обусловлены разрушениями массива в окрестности как одиночных выработок, так и их систем. Вследствие этого остро встаёт задача количественной оценки геомеханической обстановки при ведении горных работ, в ходе решения которой производится обоснование типа крепи выработок и выбор рациональных технологических схем отработки угольного месторождения. Один из путей геомеханической оценки состояния приконтурного массива выработок состоит в физико-математическом моделировании геомеханического состояния массива в окрестности горных выработок.

В существующих моделях состояния массива горных пород практически не учитывается важнейшее его механическое свойство - прочностная анизотропия, обусловленная регулярными поверхностями ослабления, являющимися обобщённым понятием любых направлений в массиве, по которым характеристики прочности существенно ниже, чем по другим его направлениям. В массиве осадочных горных пород поверхностями ослабления, в основном, являются слоистость и кливаж. Поэтому вполне очевидно, что его разрушение, в первую очередь, происходит по поверхностям ослабления, вследствие чего, за контуром выработок образуются зоны нарушения сплошности (ЗНС) [1, 2]. Наличие зон - одновременно показатель разрушения анизотропного по прочности массива и критерий его устойчивости. По размерам и конфигурации ЗНС можно судить о степени разрушения массива около выработки, выбрать рациональную её форму, разработать паспорт крепления, в первую очередь, с помощью анкерной крепи. В этой связи учёт прочностной анизотропии в геомеханических расчётах вмещающего массива позволяет получить обоснованные оценки разрушения массива и в соответствии с ними дать достоверную картину устойчивости выработок и путей их повышения, обеспечивая тем самым безопасность проходческих работ.

Как известно, зоной нарушения сплошности (ЗНС) называется область массива, окружающего выработку, в точках которой не выполняются условия прочности как по основной породе, расположенной между поверхностями ослабления, согласно критерию прочности Кулона – Мора [3], так и по этим поверхностям в соответствии с критерием прочности Мора – Кузнецова [4]. Очевидно, что параметры ориентации (углы падения α и простирания β) поверхностей ослабления относительно трассы выработки могут существенно по-

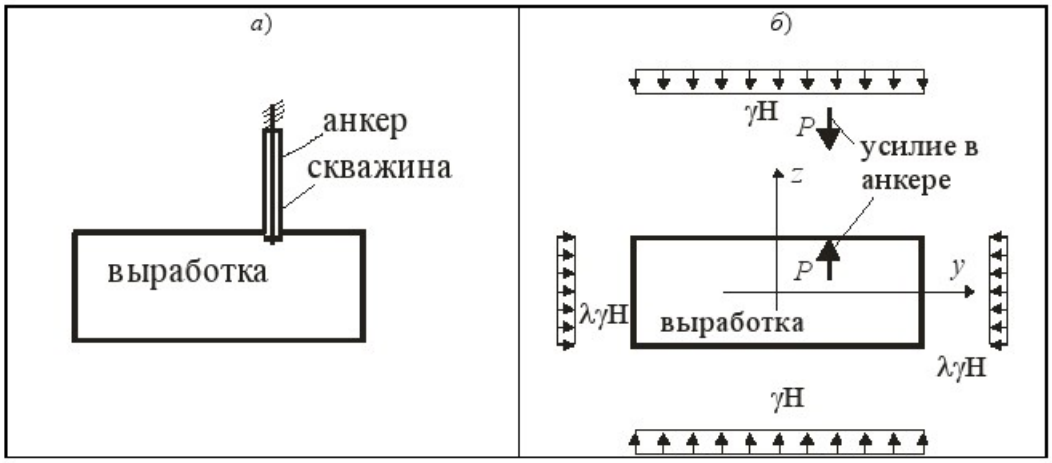
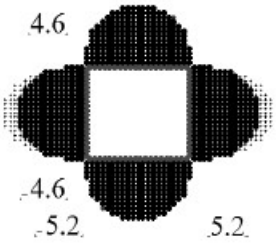
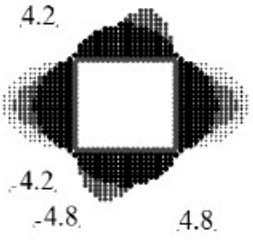
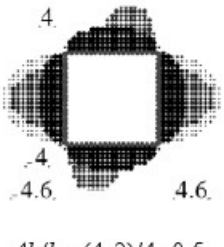
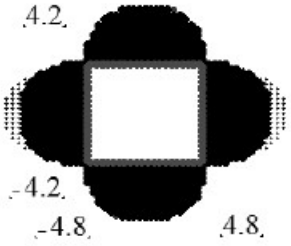
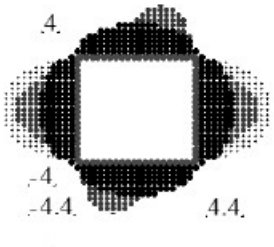
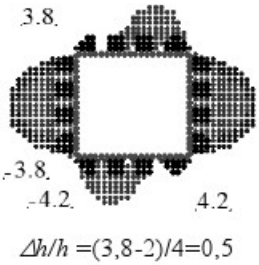
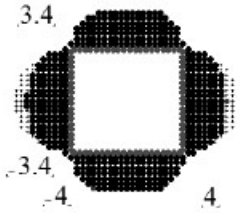
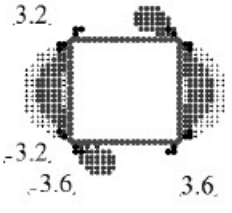
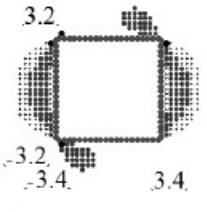


Рис. 1 – Расчётная схема массива с выработкой, закрепленной анкерами

Таблица 1. Картины ЗНС около выработки закреплённой анкерами

Коэффициент крепости f	0,25	0,75	1,0
Усилие в анкере, kH	Число анкеров на каждой стороне выработки – n_{ank}=0		
0	 $\Delta h/h$=(4,6-2)/4=0,65 $\Delta b/b$=(5,2-2)/4=0,8	 $\Delta h/h$=(4,2-2)/4=0,55 $\Delta b/b$=(4,8-2)/4=0,7	 $\Delta h/h$ =(4-2)/4=0,5 $\Delta b/b$=(4,6-2)/4=0,65
Усилие в анкере, kH	Число анкеров на каждой стороне выработки - n_{ank}=3		
800	 $\Delta h/h$ =(4,2-2)/4=0,55 $\Delta b/b$=(4,8-2)/4=0,7	 $\Delta h/h$ =(4-2)/4=0,5 $\Delta b/b$=(4,4-2)/4=0,6	 $\Delta h/h$ =(3,8-2)/4=0,5 $\Delta b/b$=(4,2-2)/4=0,55
Усилие в анкере, kH	Число анкеров на каждой стороне выработки - n_{ank}=10		
1000	 $\Delta h/h$ =(3,4-2)/4=0,35 $\Delta b/b$=(4,0-2)/4=0,5	 $\Delta h/h$ =(3,2-2)/4=0,3 $\Delta b/b$=(3,6-2)/4=0,4	 $\Delta h/h$=(3,2-2)/4=0,3 $\Delta b/b$=(3,4-2)/4=0,35

влиять на размеры зон нарушения сплошности в её окрестности.

Проблеме геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, вмещающего горные выработки, посвящён ряд статей, например, [5, 6], в которых результаты представлены картинами зон нарушения сплошности и графиками изменения размеров нарушенности при различных параметрах среды. В [7] по результатам проведённых исследований геомеханического состояния в окрестности выработки квадратного поперечного сечения установлены значения углов падения и простирания поверхностей ослабления, при которых зоны нарушения сплошности массива наибольшие (экстремальный случай). В перечисленных статьях анализ состояния массива в окрестности выработки производился без учёта влияния её крепи, т.е. реактивный отпор, создаваемый крепью, не принимался в расчёт.

В этой статье исследования геомеханического состояния (состояния разрушения по перечисленным критериям прочности) в окрестности одиночной выработки квадратного сечения с учётом влияния усилий в анкерах, расположенных перпендикулярно её сторонам, проведены в рамках модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, представленной в [2].

Схема выработки с анкером, подкреплённой изнутри анкерной крепью с усилием P, показана на рис. 1 *а*. На рис. 1 *б* приведена расчётная схема

массива, вмещающего выработку, нагруженного литологическими силами, вызванными действием налегающей сверху толщи горных пород γH (γ – плотность пород, H – глубина заложения выработки) и усилиями в анкере. Одна из этих сил приложена к контуру выработки, а другая, прямо противоположная, действует на массив на расстоянии длины анкера. Первая сила учитывается в граничном интегральном уравнении, после решения которого напряжения в произвольной точке массива определяются суммированием напряжений от действия фиктивной нагрузки (плотности слоя) и напряжений нетронутого массива. Вторая сила вызывает в массиве напряжения, вычисляемые по формулам, вытекающим из решения задачи Кельвина, о действии силы на упругое пространство. Общие же напряжения определяются путём суммирования с предыдущими напряжениями на основе принципа суперпозиции. Длина анкера принимается на 10 – 20% больше максимального размера ЗНС.

Ниже представлены результаты расчёта геомеханического состояния (состояния нарушенности) массива, вмещающего выработку квадратного сечения $b=h=4м$. Глубина заложения выработки $H=400м$, средняя плотность налегающих пород $\gamma=25\ kH/м^3$. Остальные данные приняты следующими: коэффициент бокового давления $\lambda=1$, угол внутреннего трения $\varphi=20^0$. Коэффициент крепости пород f в расчётах колебался в пределах от $0,25$ до $1,5$. Коэффициент сцепления по поверхности ослабления K принимался $0,25 \cdot K_0$ (K_0 – коэффициент сцепления по основной породе, связанный с пределом прочности на одноосное сжатие σ_c

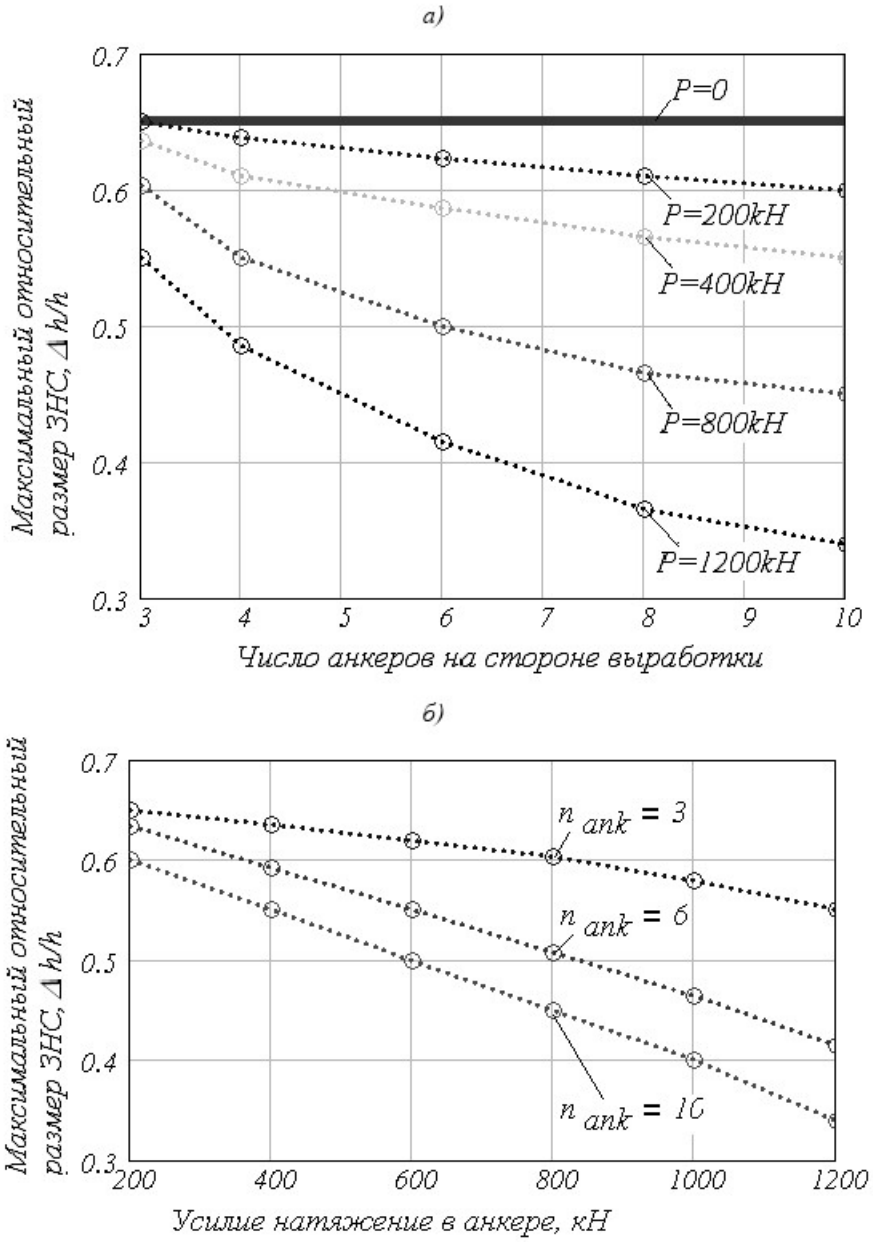


Рис. 2. Кривые изменения максимальных размеров ЗНС массива с f=0,25 в кровле выработки в зависимости от параметров армирования выработки

известной зависимостью $K_0=\sigma_r(1-\sin\varphi)/(2\cos\varphi)$. Картины нарушения сплошности массива вокруг выработки построены по результатам проверки прочности по трём условиям: 1) Кулона – Мора по основной породе, 2) Мора - Кузнецова по первой системе поверхностей ослабления, у которой $\alpha=55°$, $\beta=0°$, 3) Мора - Кузнецова по второй системе поверхностей, у которой $\alpha=90°$, $\beta=35°$. В работе [7] установлено, что наибольшие разрушения согласно критерию Мора - Кузнецова происходят именно по этим двум системам ослаблений. Причём, по первой системе максимальные разрушения происходят в почве и кровле, а по второй - в бортах выработки. Длина анкера, а также усилие натяжения в нём для каждого коэффициента крепости пород принималась во всех анкерах одинаковой. Состояние массива в окрестности замковой (концевой) части анкера здесь не рассматривается. Полагается, что за пределами зон нарушения сплошности массив достаточно прочный и под действием усилий натяжения анкеров на всём диапазоне их изменения его разрушения не произойдёт.

В табл. 1 показаны картины зон нарушения сплошности массива, полученные для ряда значений коэффициента крепости основной породы f и усилий (натяжений) в анкерах. Цифры на фрагментах таблицы указывают вертикальные и горизонтальные границы ЗНС выработки. Там же вычислены максимальные относительные размеры ЗНС в кровле ($\Delta h/h$) и бортах ($\Delta b/b$) выработки. На этих фрагментах чёрным цветом обозначены зоны нарушения сплошности (разрушения) по основной породе, тёмно серым – по первой системе ослаблений, светло серым – по второй.

Следует, отметить, что размеры зон наруше-

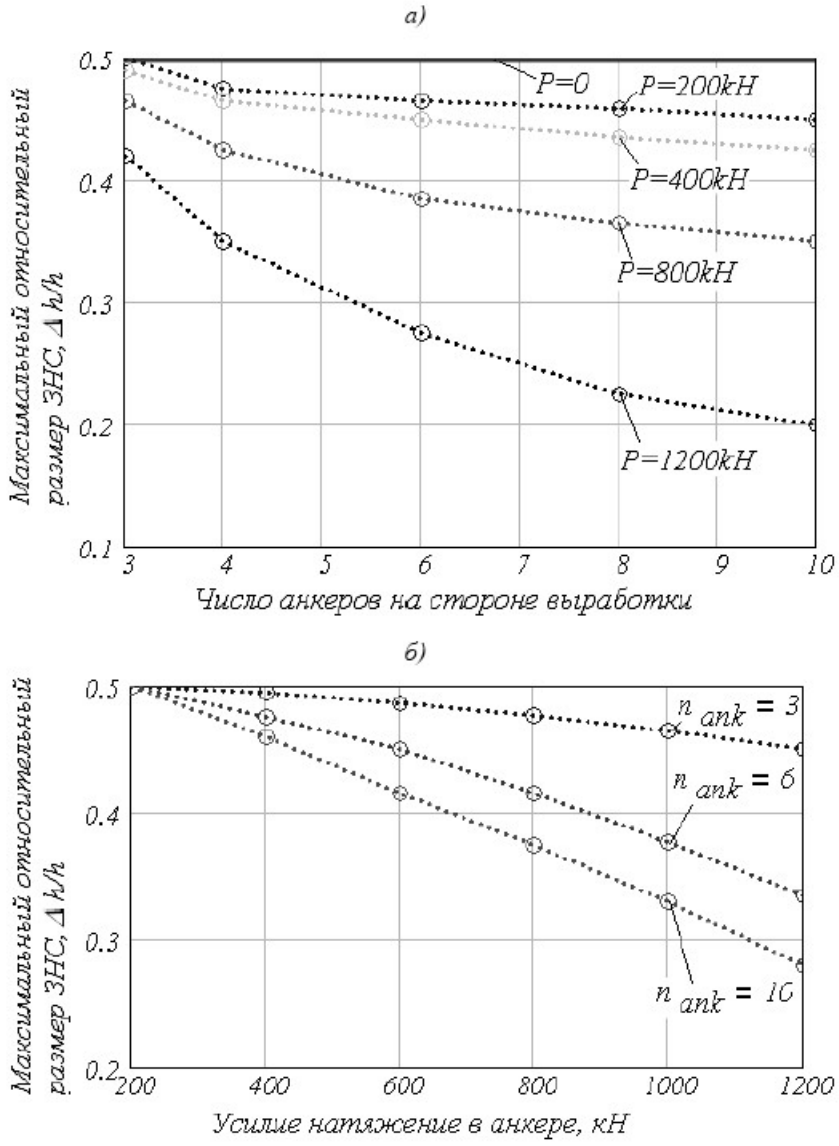


Рис. 3. Кривые изменения максимальных размеров ЗНС массива с f=0,75 в кровле выработки в зависимости от параметров армирования выработки

ния сплошности вокруг выработки в бортах превышают размеры аналогичных зон в кровле. Видно, что с уменьшением коэффициента крепости пород более интенсивно растут разрушения по основной породе по сравнению с разрушениями по поверхностям ослабления. С увеличением же *f* основную роль в общих разрушениях массива играют разрушения по поверхностям ослабления.

На рис. 2 *а* представлены графики изменения максимальных относительных размеров ЗНС массива, коэффициент крепости которого *f=0,25*, в зависимости от числа анкеров, установленных по контуру выработки для ряда значений усилий в анкерах. А на рис. 2 *б* графики изменения максимальных относительных размеров ЗНС массива с тем же коэффициентом крепости *f=0,25* построены в зависимости от усилий натяжения в анкерах для ряда значений плотности армирования контура выработки.

На рис. 3 (*а, б*) аналогичные графики представлены для массива с *f=0,75*.

По характеру изменения графиков на рисунках 2*а* и 3*а* отметим следующее. При небольшом усилии натяжения анкеров кривая изменения размеров зон нарушения сплошности при увеличении плотности расстановки этих анкеров является достаточно пологой кривой. С увеличением натяжения анкеров её кривизна увеличивается.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Применение модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива обеспечивает достаточно полное исследование влияния усилий натяжения анкеров и плотности их расстановки по контуру поперечного сечения выработки на размеры зон нарушения сплошности (областей разрушения) вмещающего массива.

2. Влияние анкерной крепи на размеры зон нарушения сплошности массива становится значительным только при большом усилии натяжения анкеров и высокой плотности их расстановки. Так при *f=0,25*, сорока анкерах, установленных равномерно по контуру выработки и усилии в каждом анкере *1200 kH* (*120 m*) размер зоны нарушения сплошности в кровле выработки уменьшается на *47,7%*. Однако создать такое натяжение в современных анкерах невозможно. Максимальная несущая способность наиболее мощного канатного анкера составляет порядка 40 *m*. При таком усилии и наиболее реальной плотности расстановки в 24 анкера уменьшение зоны нарушения сплошности в кровле составляет всего 6,15%. Для массива с *f*=1 уменьшение размера зоны достигает 7%.

Расчёт анкерной крепи должен проводиться следующим образом. Сначала производится расчёт состояния массива, вмещающего незакреплённую выработку (без учёта крепи), в результате которого определяются размеры зон нарушения сплошности. Затем, ориентируясь на эти размеры, выбирают длину анкеров и рассчитывают усилия в них из условия, что они должны уравновешивать массу породы, заключённую в зоне нарушения сплошности. Каждый анкер в этом случае работает в режиме подвески. Изменить же существенно напряжённое состояние массива в окрестности выработки путём предварительного натяжения анкеров, избежав при этом расслоения массива, и тем самым обеспечить сшивку его слоёв, как показал расчёт, не удаётся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ержанов Ж.С., Изаксон В.Ю., Станкус В.М.* Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости – Кемерово: Кемеров. книжн. изд-во, 1976.–216 с.

2. *Черданцев Н.В., Изаксон В. Ю.* Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики. - Кемерово: КузГТУ, 2004.-190 с.

3. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений.–М.: Недра, 1994.–382 с.

4. *Кузнецов Г.Н.* Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. С. 30 – 44.

5. *Черданцев Н.В., Федорин В.А.* Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяжённых горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ.–2006.–№ 1.–С. 17–19.

6. *Черданцев Н.В.* Устойчивость целиков в окрестности системы выработок, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник КузГТУ.–2012.–№ 1.–С. 15–19.

7. *Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е.* Влияние параметров анизотропного по прочности массива горных пород на размеры разрушений вокруг выработок // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности.–2011.–№ 1.–С. 11 – 18.

□ Автор статьи:

Черданцев
Николай Васильевич,
докт. техн. наук, зав. лабораторией
геомеханики угольных месторождений Института угля СО РАН.
E-mail: cherdantsevnv@icc.kemsc.ru