

УДК 622.831; 622.2; 622.235

**В.А. Еременко, Л.Н. Гахова, В.Н. Лушников,
Е.Н. Есина, Е.Н. Семенякин**

**ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ ВЫСОКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
С ГРАВИТАЦИОННО-ТЕКТОНИЧЕСКИМ ИСХОДНЫМ
НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА
ГОРНЫХ ПОРОД**

На основе проведенных исследований с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород определены условия формирования зон концентрации напряжений при проходке горизонтальных и вертикальных выработок, а также очистного пространства, подтвержденные экспериментальными исследованиями в натурных условиях в массивах с гравитационно-тектонических исходным напряженным состоянием. Показано, что в условиях действия повышенных горизонтальных напряжений термин «зона опорного давления» применяется корректно при развитии горных работ в горизонтальных и субгоризонтальных направлениях.

Ключевые слова: горизонтальные тектонические напряжения, зона опорного давления, динамические явления, численное моделирование, компоненты напряжений, коэффициент концентрации, коэффициент бокового давления, выработка, участок.

При разработке удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири в регионе современной тектонической активности недр регистрируется большое количество сейсмических явлений, которые в большей степени вызваны объемами и интенсивностью извлечения рудной массы, чем тектоническими процессами. Исходное напряженное состояние массива является гравитационно-тектоническим, так как горизонтальные напряжения превышают вертикальные вне зоны очистной выемки в 1,3-2,6 раза, в зоне — в 3,5-5,2 [1, 2]. Глубина горных работ на месторождениях достигла 1050 м [3, 4]. При переходе горных работ на большую глубину увеличивается горное давление и изменяются физико-механические свойства горных пород [5, 6].

Применение системы разработки этажного принудительного обрушения

с отработкой рудных тел сплошным фронтом без оставления целиков позволяет управлять горным давлением за счет погашения выработанного пространства обрушенными вмещающими горными породами. Наибольшее влияние на массив горных пород оказывают взрывные работы [7, 8]. Масса заряда ВВ технологических (в среднем 0,7-20 т) и массовых взрывов (в среднем 120-370 т) изменяется от 0,5 до 700 т, при этом обрушается массив объемом от 30 до 250 тыс. м³ и более.

Микросейсмическим методом регистрируются динамические явления с сейсмической энергией от 10 до 10⁹ Дж (удары горно-тектонического типа, горные удары, микроудары, толчки и др.), сопровождающиеся выбросами руды (породы) в подземные выработки объемом свыше 10 м³, разрушением крепи, смешением машин,

механизмов и оборудования, приводящим к нарушению технологического процесса (рис. 1).

Механизмы формирования зон концентрации напряжений и динамических явлений на месторождениях с гравитационно-тектоническим исходным напряженным состоянием массива горных пород различные в силу разнообразия форм разрушения в разрабатываемых шахтных полях, а также наличия выработок и проведения взрывов (рис. 2, 3) [9-11].

Рассмотрены особенности формирования этих зон при разработке удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири. Вследствие перераспределения напряжений при нарушении сплошности массива формируются зоны концентрации сжимающих напряжений, действующих вблизи контура обнажения отрабатываемого рудного участка. Их наличие определяется методами кернового бурения, электрометрии и глубинными реперными станциями. На значительных расстояниях от выработанного пространства наблюдаются смещения, из-за неравномерности которых происходит деформирование массива и изменение его напряженного состояния (рис. 4). Наибольшая концентрация действующих напряжений определена в массиве на расстояниях от 20 до 60 м от границы выработанного пространства, где значения напряжений приближены или выше предела прочности горных пород (табл. 1) (рис. 5) [12]. В этих областях механические процессы под воздействием техногенных факторов происходят с большей интенсивностью.

Еще в 1940-е годы проф. Слесарев В. Д. высказал идею о наличии впереди очистного забоя разрушенной части пласта угля, прилегающей к выработанному пространству, и обу-

словливающей перемещение максимума зоны опорного давления вглубь угольного массива (рис. 6) [13]. По его определению горное давление есть следствие деформаций пород, равновесие которых нарушено проведением выработок. Деформации в свою очередь являются следствием напряженного состояния горных пород, т. е. определяются существующими в породах напряжениями и их величинами. В зависимости от глубины залегания выработки, ее размеров, характеристики породы, в которой она проведена интенсивность деформации пород может быть различна. Нарушение выработки как со стороны кровли и боков, так и со стороны почвы является результатом проявления общего давления — вертикального, бокового и давления снизу вверх. Самым значительным давлением, как по своему постоянному присутствию, так и по вызываемым нарушениям, является вертикальное давление [13].

На основе большого объема инструментальных наблюдений этот вопрос был сформулирован в работах по решению проблемы горных ударов на угольных шахтах Кизеловского бассейна [14]. Именно здесь стали говорить о зоне с предельно напряженным состоянием и о предельном ее насыщении потенциальной энергией. Зона опорного давления определялась не как зона разрушенного горным давлением угля, а как зона, в которой напряжения распределяются в зависимости от степени устойчивости краевой части пласта, возрастающей при удалении от его края. Малейшие изменения в устойчивости краевой части пласта (например, внедрение бара машины, проведение взрыва и др.) вызывает немедленное перераспределение нагрузок в этой зоне, передачу их вглубь массива.



Рис. 1. Последствия горных ударов на Таштагольском руднике

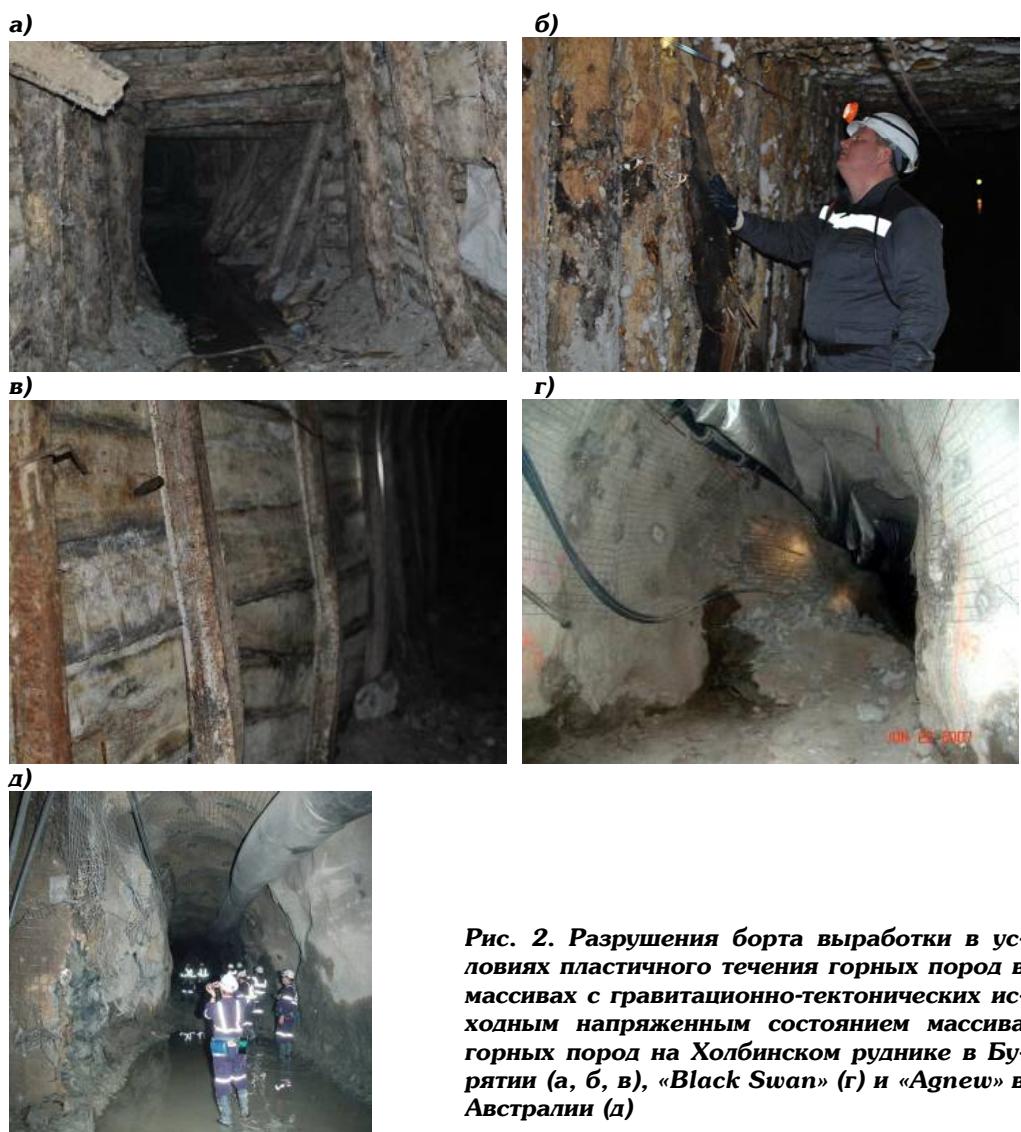


Рис. 2. Разрушения борта выработки в условиях пластичного течения горных пород в массивах с гравитационно-текtonических исходным напряженным состоянием массива горных пород на Холбинском руднике в Бурятии (а, б, в), «Black Swan» (г) и «Agnew» в Австралии (д)



Рис. 3. Деформирование борта и кровли выработки расположенной на границе шахтного поля подверженной действию опорного давления на руднике в Argyle Diamonds в Австралии

Угольный пласт в рассматриваемой зоне сохраняет способность накапливать потенциальную энергию упругого сжатия, запасы которой пропорциональны квадрату величин действующих напряжений.

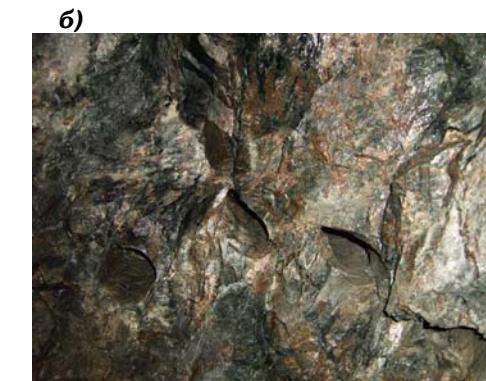
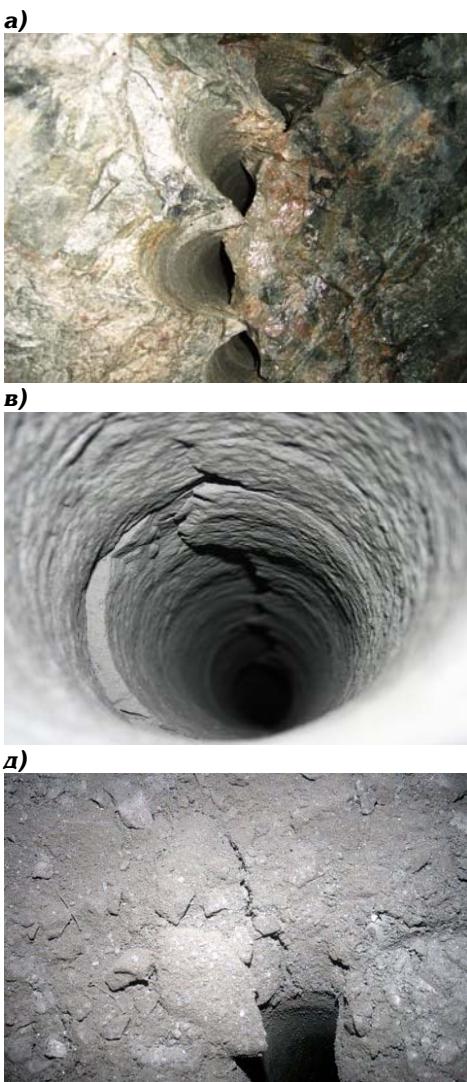


Рис. 4. Деформирование массива в зонах концентрации напряжений на рудниках Горной Шории и Хакасии: сжатие скважин (а, б, в); заколообразование (г); образование магистральных трещин «Ортлеппа» (д)

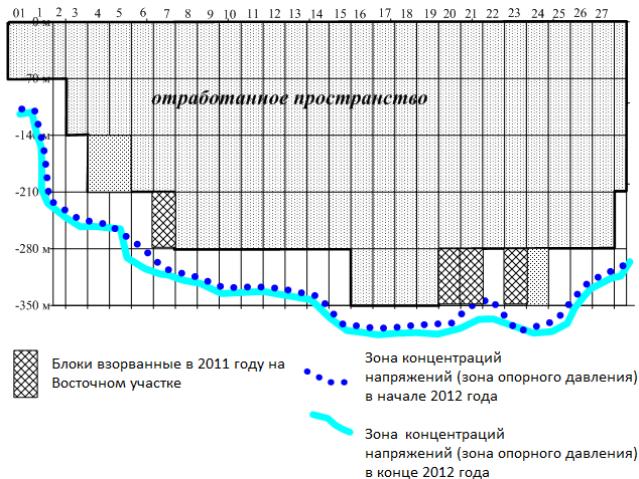


Рис. 5. Схема формирования зоны концентрации напряжений при отработке Восточного участка Таштагольского месторождения в 2012 году. 01ч27 – номера блоков; ± 0 ч -350 м – горизонты в шахте

Это положение о предельном насыщении потенциальной энергией является основой новых представлений о зоне предельно напряженного состояния [14].

Профессор И. М. Петухов также указывает на то, что ширина зоны предельно напряженного состояния

впереди очистного забоя изменяется, существенно возрастая в районе подвигающегося уступа впереди бара комбайна [5]. При расстоянии менее $0,3 \div 0,5 \cdot l$ (где l - ширина зоны опорного давления) дальнейшее подвигание очистного забоя приводит к увеличению скоростей деформации угля и сближения боковых пород (рис. 7). Данный процесс происходит из-за перераспределения нагрузок на пласт, вызванный взаимодействием двух зон опорного давления: зоны, установившейся впереди очистного забоя в целом, и зоны, вызванной влиянием подвигающегося уступа. При этом следует, что до появления уступа впереди очистного забоя в угольном пласте существовало предельно напряженное состояние и предельное насыщение потенциальной энергией упругого сжатия. Появление зоны опорного давления впереди

**Таблица 1
Местоположение зон концентрации напряжений**

Наименование опасной зоны	Местоположение опасной зоны
Зона концентраций напряжений (опорного давления) от выработанного пространства Восточного участка	Выработки горизонта подсечки и заходки под ВДПУ блока № 32 в этаже -350 ÷ -280 м
Зона концентраций напряжений (опорного давления) от выработанного пространства Восточного участка	Выработки горизонта подсечки и заходки под ВДПУ блока № 14 в этаже -350 ÷ -280 м
Зона концентраций напряжений (опорного давления) от выработанного пространства Восточного участка	Выработки горизонта подсечки и заходки под ВДПУ блока № 13 в этаже -350 ÷ -280 м
Зона концентраций напряжений (опорного давления) от выработанного пространства Восточного участка	Выработки горизонта подсечки и заходки под ВДПУ блока № 34 в этаже -350 ÷ -280 м
Зона концентраций напряжений (опорного давления) от выработанного пространства Восточного участка	Выработки горизонта подсечки и заходки под ВДПУ блока № 35 в этаже -350 ÷ -280 м

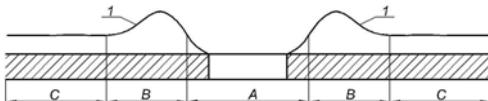


Рис. 6. Влияние выработки на боковые породы (по проф. В.Д. Слесареву): 1 – эпюра распределения напряжений; А – зона пониженных напряжений (зона разгрузки); В – зона повышенного давления (зона опорного давления); С – зона нормального давления

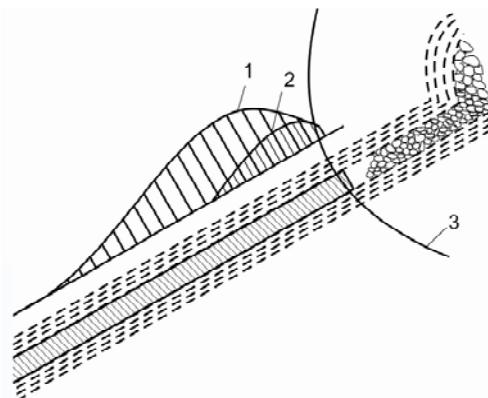


Рис. 7. Схема напряженного состояния горного массива (по проф. И.М. Петухову): 1 и 2 – зоны опорного давления соответственно на больших и малых глубинах ведения горных работ; 3 – зона разгрузки

уступа создает условия нестабильности, при которых впереди забоя формируется общая зона предельно напряженного состояния.

По современным представлениям одновременно с процессом сдвижения происходит перераспределение горного давления в подрабатываемом массиве [15], где образуются зоны временного опорного давления, разгрузки и уплотнения пород, которые перемещаются в пространстве вместе с движущимся фронтом очистных работ подрабатываемого массива. Классическое понимание опорного горного давления, определенное проф. В.Д. Слесаревым, а позже приведенное в работах проф. И.М. Петухова и др. ученых, рассматривалось в основном

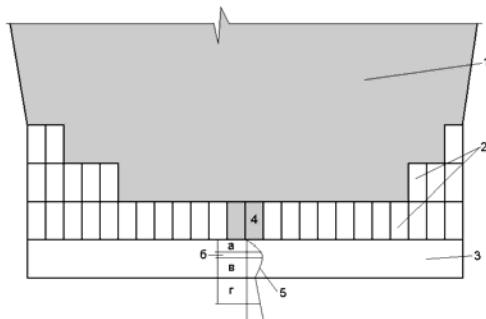


Рис. 8. Характер распределения напряжений в массиве. Зона разгрузки горных пород (а), зона максимальных концентраций напряжений (б), зона повышенных напряжений (в), повышение значений напряжений с глубиной в массиве вне зоны влияния очистных работ (г): 1 – выработанное пространство, заполненное обрушенными горными породами; 2 – блоки; 3 – нижележащий этаж; 4 – обрушенные блоки; 5 – эпюра распределения напряжений

для горизонтальной отработки угольных залежей полезных ископаемых, несколько отличающихся от условий разработки железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии. В классическом случае основную роль играет опорное давление, которое возникает впереди выработанного пространства от веса толщи налагающих пород. При разработке железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии определяющим является не опорное давление, вызванное весом толщи налагающих пород, а горизонтальные тектонические напряжения (рис. 5, 8) [12].

Вследствие этого, применяемый на горнодобывающих предприятиях термин оценки НДС массива горных пород – «зона опорного давления», недостаточно правильно характеризует зону максимальных концентраций напряжений, формирующуюся в районе выработанного пространства.

Проведение аналитических исследований с использованием численного

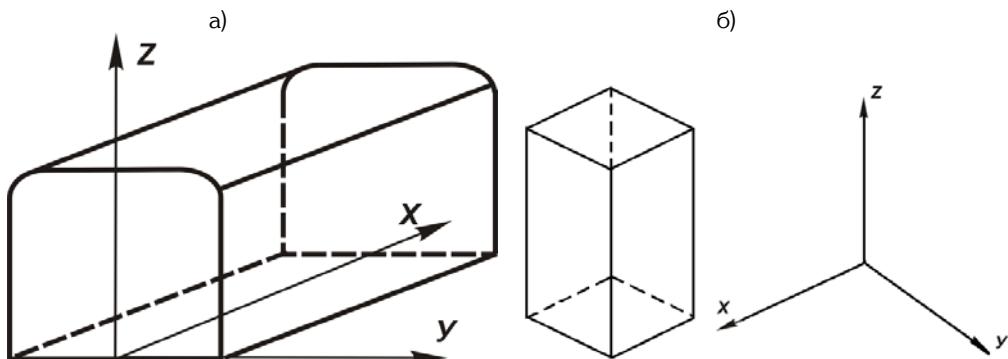


Рис. 9. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) выработка. X, Y и Z – оси координат

моделирования позволило определить местоположение зон концентрации горизонтальных напряжений, а также коэффициент бокового давления.

Расчеты выполнялись на примере протяженной горизонтальной выработки размером $4 \times 3,5 \times 16$ м (ширина – высота – длина) (рис. 9, а) и вертикальной размером $4 \times 16 \times 3,5$ м (ширина по простианию – высота – ширина вкrest простиания), т.е. с изменением направления проходки на 90° (рис. 9, б). Массив горных пород представлен упругим изотропным материалом с механическими свойствами руд и пород Таштагольского месторождения. Для горизонтальной выработки: ось X – по простианию выработки (длина), Z – высота и Y – ширина (поперек выработки). Задавалось исходное напряженное состояние: $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \lambda \gamma H$; $\sigma_z^0 = \gamma H = 1$.

Для вертикальной выработки: ось X – ширина по простианию, Z – по высоте выработки и Y – ширина вкrest простиания. Расчеты выполнялись для коэффициента бокового давления $\lambda = 0,5; 1; 2; 3$ и 5 .

Для условий отработки железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии (вертикальные напряжения γH) в расчетах определяются коэффициенты концентрации соот-

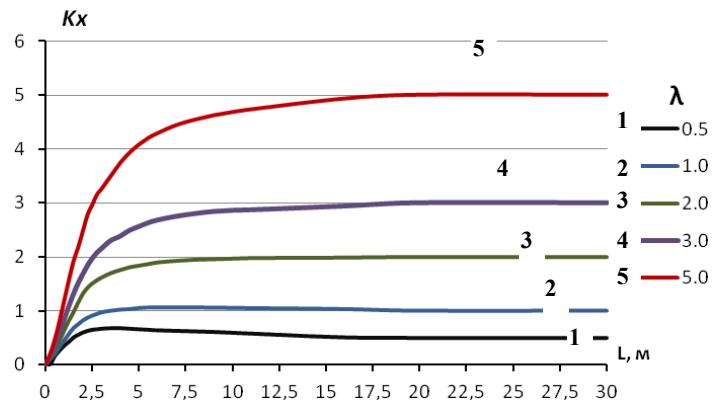
вествующих компонент напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), т.е. κ_x, κ_y и κ_z . Компоненты напряжений получаем умножением исходного напряжения γH для σ_z или $\lambda \gamma H$ для σ_x, σ_y , на соответствующий коэффициент концентрации.

Для определения опорного давления рассчитывается компонента тензора напряжений в вертикальном направлении (σ_z). На рис. 10 представлены соответствующие коэффициенты концентрации, распределенные по линии L , направленной вдоль горизонтальной выработки вглубь массива, от центра торца выработки.

Установлено, что чем больше горизонтальная составляющая тензора напряжений в нетронутом массиве, тем на большем расстоянии от забоя горизонтальной выработки коэффициент концентрации κ_x приближается к значению в нетронутом массиве (рис. 11). При $\lambda = 0,5$ на расстоянии 2,5 м напряжения σ_x достигают значений в нетронутом массиве, при $\lambda = 3$ расстояние увеличивается почти на два размера ширины выработки.

Вертикальная составляющая тензора напряжений (опорное давление) наибольшее значение имеет при минимальном коэффициенте бокового отпора $\lambda=0,5$; вертикальные здесь напряжения,

a)



б)

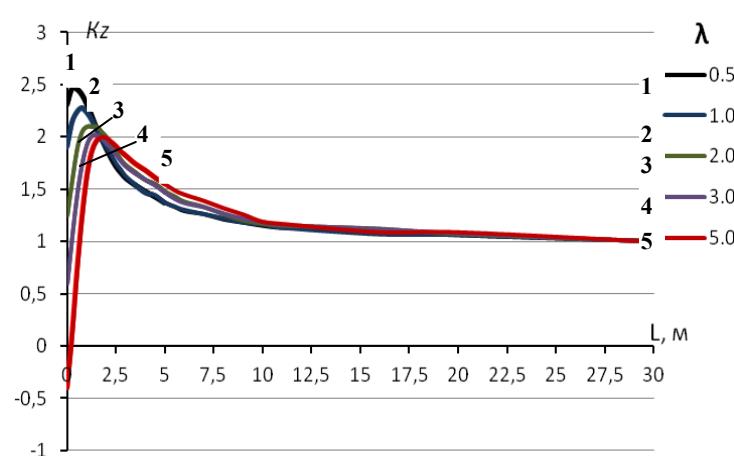
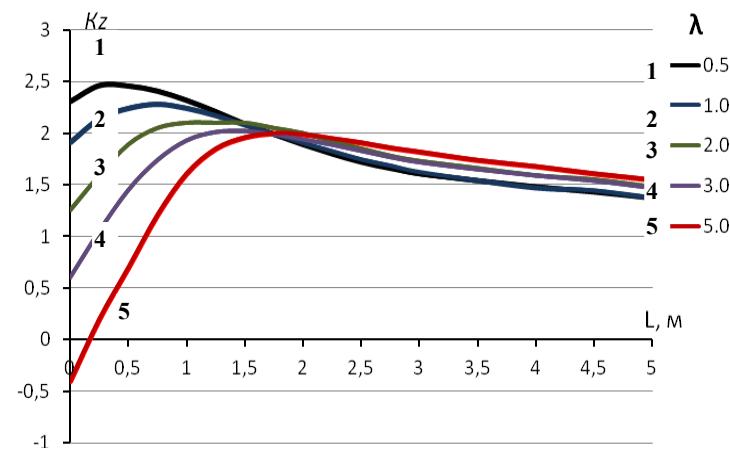


Рис. 10. Коэффициент концентрации горизонтальных (а) и вертикальных напряжений (б) в направление вдоль горизонтальной выработки: λ - коэффициент бокового давления; K_x , K_z - коэффициент концентрации



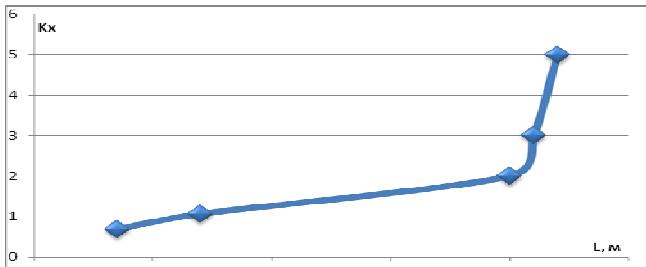


Рис. 11. Расстояние от забоя горизонтальной выработки до зоны концентрации горизонтальных напряжений K_x при $\lambda = 0,5; 1; 2; 3$ и 5

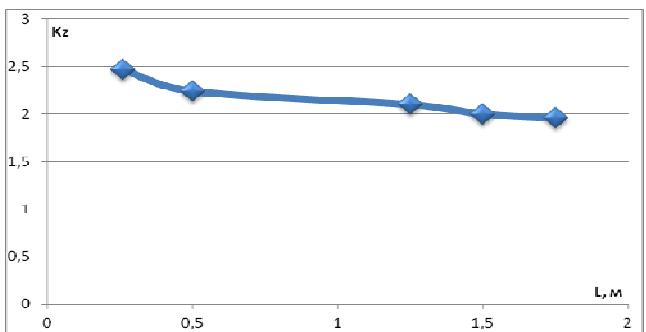


Рис. 12. Расстояние от забоя горизонтальной выработки до зоны концентрации вертикальных напряжений K_z при $\lambda = 0,5; 1; 2; 3$ и 5

действующие в нетронутом массиве, увеличиваются в 2,5 раза; опорное давление формируется на минимальном расстоянии от торцевой поверхности выработки на расстоянии не более 0,25 м (рис. 10, б). С увеличением бокового давления в нетронутом массиве максимальные значения коэффициента концентрации вертикальной составляющей тензора напряжений уменьшаются, а расстояние до формируемой зоны опорного давления от краевой поверхности выработки увеличивается (рис. 12).

На рис. 13 представлены соответствующие коэффициенты концентрации, распределенные по линии L , направленной вдоль вертикальной вы-

работки вглубь массива (вниз), от центра торца выработки.

При проходке вертикальной выработки, установлено, чем больше горизонтальная составляющая тензора напряжений в нетронутом массиве, тем на меньшем расстоянии от забоя выработка формируется зона концентрации вертикальных напряжений (рис. 14). Коэффициент концентрации вертикальных напряжений K_z (опорное давление), например, для $\lambda = 5$ равен 2,5, т.е. в два раза меньше, чем коэффициент бокового давления. С увеличение бокового давления в нетронутом массиве максимальные значения коэффициента концентрации горизонтальных составляющей тензора напряжений увеличиваются, а расстояние до формируемой зоны концентрации горизонтальных напряжений от краевой поверхности выработки уменьшается (рис. 15).

Сравнение значений концентраций вертикальных и горизонтальных напряжений позволило установить, что при проходке горизонтальной выработки в массиве вблизи ее торца формируется зона концентраций вертикальных напряжений, максимальные значения которых уменьшаются с ростом горизонтальной составляющей тензора напряжений исходного массива (рис. 10). При проходке вертикальной выработки в районе днища формируется зона концентрации максимальных горизонтальных напряжений, при этом горизонтальные

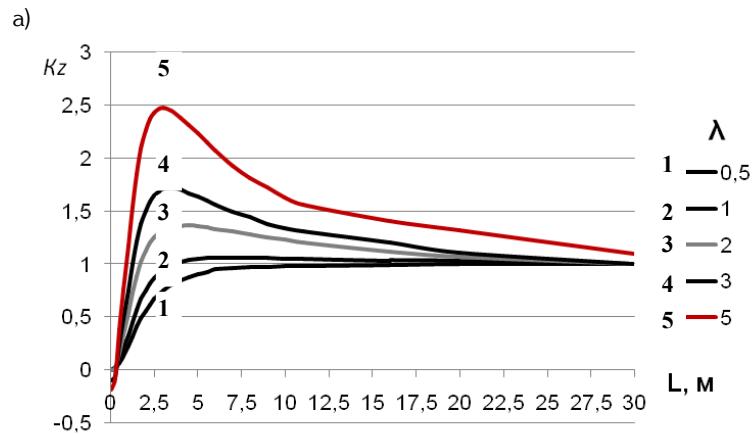
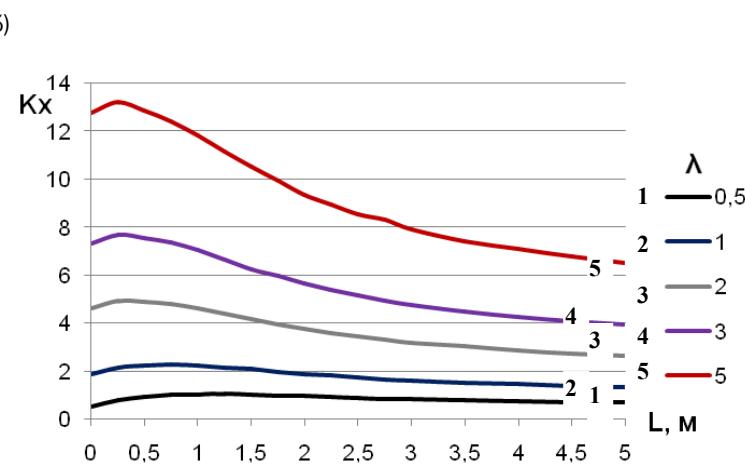
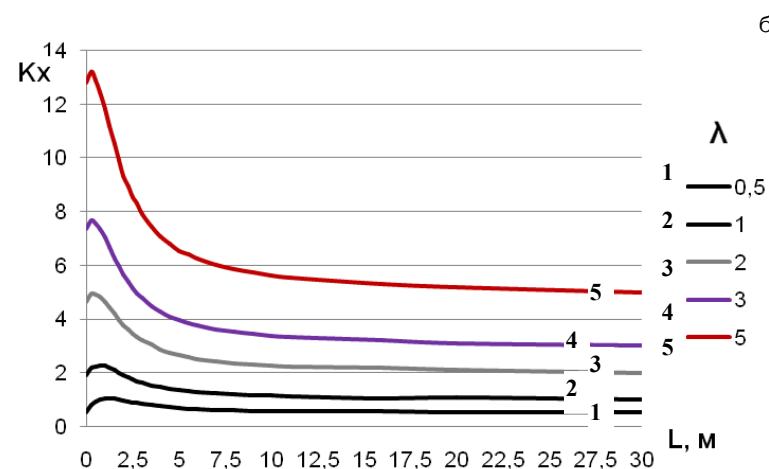


Рис. 13. Коэффициент концентрации вертикальных (а) и горизонтальных напряжений (б) по направлению вдоль вертикальной выработки:

λ - коэффициент бокового давления; K_x , K_z - коэффициенты концентрации



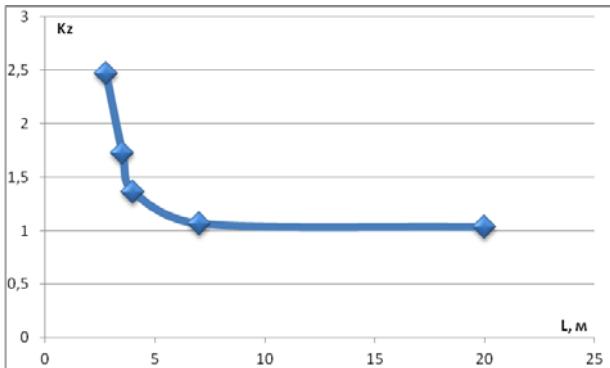


Рис. 14. Расстояние от забоя вертикальной выработки до зоны концентрации вертикальных напряжений k_z при $\lambda = 5; 3; 2; 1$ и $0,5$

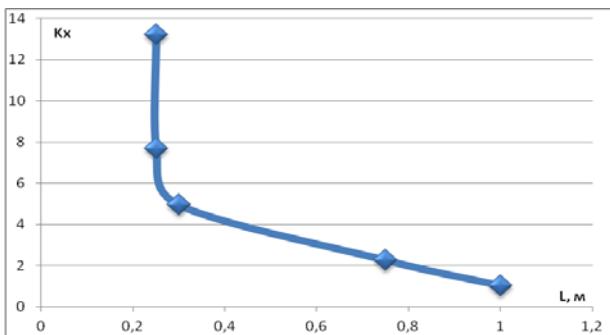


Рис. 15. Расстояние от забоя вертикальной выработки до зоны концентрации горизонтальных напряжений k_x при $\lambda = 5; 3; 2; 1$ и $0,5$

напряжения превышают вертикальные более чем в пять раз и их значения достигают величины 13 МН при $\lambda = 5$ (рис. 13).

Результаты расчетов позволяют утверждать, что в массивах с гравитационно-тектоническим исходным полем напряжений впереди фронта ведения очистных работ или выработки формируется «зона бокового давления» или зона концентраций горизонтальных напряжений [12].

Значения напряжений и местоположение зон их концентрации, подтверждаются результатами проведенных экспериментальных исследований в натурных условиях с применением различных методов контроля напряженно-деформированным состоянием массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. - Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
2. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам / ВостНИГРИ, ВНИМИ. — Новокузнецк, 1991. – 90 с.
3. Еременко А.А., Еременко В.А., Гайдин А.П. Совершенствование геотехнологии освоения железорудных удароопасных месторождений в условиях действия природных и техногенных факторов. — Новосибирск: Наука, 2008. – 250 с.
4. Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И. Разработка руд на больших глубинах. - М.: Недра, 1982. – 292 с.
5. Петухов И.М., Батутина И.М. Геодинамика недр. – М.: Недра, 1999. – 288 с.
6. Турчанинов И.А. О взаимосвязи напряжённого состояния и свойств горных пород // ФТПРПИ. — 1978. — № 2. — С. 20-25.
7. Матвеев И.Ф. Управление удароопасностью горного массива изменением параметров взрывной отбойки при разработке железорудных месторождений Сибири // Автотеф. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. Кемерово: КузГТУ, 2004. – 34 с.
8. Еременко В.А. Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений Западной Сибири // ГИАБ. — 2012. — № 11. — С. 50-59.

9. Еременко В.А., Лушников В.Н., Сэнди М.П., Милкин Д. А., Мильшин Е.А., Кшановский В.С. Выбор и обоснование технологии проведения и способов крепления горных выработок в неустойчивых горных породах на глубоких горизонтах Холбинского рудника // Горн. журнал.— 2013. — № 7.
10. Еременко В.А., Семенякин Е.Н. Исследование механизма формирования динамических явлений и зон их концентрации при разработке удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири // ГИАБ. — 2012. — № 4. — С. 67-68.
11. Eremenko V., Eremenko A., Gakhova L., Klishin I. Finding zones of stress concentrations and seismic events in deep ore mining affected by high horizontal stresses. Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining 2012. — Perth 2012. — 28-30 March 2012, Australia. — С. 443-450.
12. Еременко В.А., Гахова Л.Н., Семенякин Е.Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРГИ. — 2012. - № 2. — С. 80-87.
13. Слесарев В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление. – М.: Углехимиздат, 1948. – 304 с.
14. Петухов И.М. Горные удары в угольных шахтах. – М.: Недра, 1972. – 229 с.
15. Черняев В.И., Зборщик М.П., Иофис М.А., Грищенков Н.Н., Нестеренко Б.И. Маркшейдерское обеспечение безопасного ведения горных работ на угольных шахтах. – М.: ИПКОН РАН, 2001. – 208 с.
- ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Еременко Виталий Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИПКОН РАН, eremenko@ngs.ru,
 Гахова Лидия Николаевна – старший научный сотрудник ИГД СО РАН, gahoval@mail.ru,
 Лушников Вадим Николаевич – ведущий горный инженер компании «Australian Mining Consultants Pty Ltd», vlouchnikov@amccconsultants.com,
 Есина Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПКОН РАН, esina555@list.ru,
 Семенякин Евгений Николаевич – аспирант ИПКОН РАН, en.sem@mail.ru,



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ

(№ 978/09-13 от 11.06.13, 8 с.)

Шкундин Семен Захарович, доктор технических наук, профессор, shkundin@mail.ru
 Танцов Петр Николаевич, аспирант, schredder! 0@yandex.ru,
 Московский государственный горный университет,
 Петров Александр Георгиевич, petrovipmech@gmail.com,
 Вановский Владимир Валерьевич, vovici@gmail.com,
 Московский физико-технический институт.

THE DYNAMIC AIRFLOW CALCULATION OF MINE VENTILATION NETWORKS.

Skundin S.Z., Tancov P.N., Petrov A.G., Vanovskiy V.V.