УДК 622.831

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ С РАЗРУШЕНИЕМ ПОЧВЫ ВЫРАБОТОК

М.Г.МУСТАФИН, *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, mustafin_m@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены основные вопросы, возникающие при изучении одного из видов горных ударов с разрушением почвы (кровли) горных выработок, проводимых по угольным пластам. Основное внимание уделено прогнозированию горных ударов путем моделирования. Проанализированы фактические данные о произошедших случаях. Освещены факторы, влияющие на возникновение этого вида разрушения. Приведены рассматриваемые модели и численные примеры. Отмечена возможность планирования безопасного ведения горных работ в разных горнотехнических и горно-геологических условиях.

***Ключевые слова**:* горный удар, горная выработка, массив горных пород, угольный пласт, напряженно-деформированное состояние пород, моделирование, сдвижение, зона повышенного горного давления.

Проблема предотвращения горных ударов, несмотря на значительные достижения в этой области как отечественных, так зарубежных исследователей, остается одной из главных при разработке месторождений твердых полезных ископаемых [2, 4-8]. Форма горных ударов довольно многообразна. Так, с начала 1980-х годов резко участились случаи возникновения одного из видов горных ударов [2-4], происходящего в породах почвы (кровли) выработок. Наблюдались они во многих угольных бассейнах, и к настоящему времени их количество исчисляется сотнями. Причем, как правило, официально регистрируются лишь те удары, которые нанесли значительный вред производству или связаны с человеческими жертвами.

На основе крупномасштабных исследований по изучению механизма горных ударов [8] сделано важное заключение в необходимости рассмотрения всей системы «выработка – вмещающие породы – прочный слой». Другими словами, горный удар следует рассматривать как процесс реализации упругой энергии при разрушении структурного элемента (например, слой породы или угольный пласт) во взаимодействии с вмещающими породами. При этом различное соотношение указанных составляющих определяет силу разрушения пород или горного удара.

Из анализа фактических данных [2-4] следует, что горные удары возникают при проведении подготовительных выработок на некотором расстоянии от забоя либо в уже пройденных выработках при изменении горнотехнической обстановки, как правило, при воздействии зон повышенного горного давления. Установлено, что в непосредственной почве выработки должен залегать слой породы m_1, прочность которого выше нижезалегающих слоев. Большинство случаев (66 %) отмечено в интервале отношений ширины выработки (a) к мощности прочного слоя (m_1) от 2 до 5. В 34 % случаев горные удары происходили при $a/m_1 > 5$, и ни одного случая не зарегистрировано при $a/m_1 < 2$. Подавляющее большинство таких горных ударов произошло при пологом падении пород. Эти результаты позволили поставить задачу о роли слоистости вмещающих подготовительную выработку пород при возникновении горных ударов этого вида.

Решение задачи о напряженном состоянии слоистой почвы подготовительной выработки выполнено с использованием отечественного программного комплекса (ПК) «НЕДРА» [5], в основе которого лежит реализация метода конечных элементов (МКЭ). Программный алгоритм МКЭ достаточно хорошо описан в литературе [9]. При подготовленных исходных данных (дискретизация области расчета, наделение каждого элемента

свойствами, установление граничных условий и т.д.) реализация метода даже для достаточно больших и сложных задач с применением современных компьютеров не встречает особых трудностей и составляет считанные минуты. Однако создание пре- и постпроцессорного программных модулей представляет собой довольно сложные технические задачи.

В ПК «НЕДРА» на основе исходной информации о массиве горных пород автоматически отстраиваются и структурная и конечно-элементная модели, а также формируется массив граничных элементов и точек, которые посредством специальных процедур используются для задания определенных граничных условий. Таким образом, производится подготовка всех исходных данных для реализации МКЭ.

Решение системы линейных уравнений, к которой сводится решение задачи по МКЭ, проводится методом Зейделя с релаксационным коэффициентом. При этом за счет использования оригинальной программной процедуры матрица жесткости системы формируется без нулевых членов в виде вектора-столбца, что позволяет на несколько порядков снизить количество используемых ячеек машинной памяти и решать практические геомеханические задачи, применяя лишь оперативную память компьютера. Представление результатов моделирования (компонентов напряженно-деформированного состояния массива горных пород и других важных расчетных параметров) выполняется в стандартном виде (изолинии или цветовое выделение расчетных параметров).

В ПК «НЕДРА» выполнено моделирование и установлено влияние фактора слоистости почвы и горнотехнических особенностей выработки на напряженное состояние почвы подготовительной выработки, которые обуславливают возникновение горных ударов с разрушением почвы. При анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) почвы выработки уточнено понятие «прочный слой», который изменяет распределение деформаций и напряжений, существующее при однородной слоистости, и служит как бы экраном, препятствующим деформированию почвы и аккумулирующим в себе значительные напряжения.

Как уже было отмечено, рассматриваемый вид горных ударов возникает при проведении подготовительной выработки на некотором удалении от забоя. Для оценки распределения напряжений в призабойной области выработки проведено объемное моделирование напряженного состояния пород, вмещающих подготовительную выработку (ширина выработки 4 м, глубина залегания 550 м). Результаты моделирования напряжений, действующих нормально напластованию, показали, что напряжения вблизи забоя невелики. На удалении от забоя примерно на расстояние трех линейных размеров сечения выработки уровень напряжений стабилизируется и значения напряжений соответствуют тем, которые получаются в результате решения плоской задачи. Это, с одной стороны, объясняет возникновение горных ударов этого вида на некотором удалении от забоя выработки, а с другой, указывает на корректность использования плоской задачи для детального изучения напряженно-деформированного состояния вмещающих подготовительную выработку пород, в том числе прочного слоя. Выполнен сравнительный анализ напряженного состояния пород у подготовительных выработок с сечением различной формы, в почве которых залегает прочный слой породы.

Обнаружилось, что на удалении от груди забоя выработки, равном ее полуширине, наименьшая разница между уровнями вертикальных напряжений в боках выработки и в ее почве возникает у выработок круглого сечения, а наибольшая – у квадратного. При проведении подготовительной выработки по угольному пласту картина распределения напряжений у выработки существенно отличается от случая ее заложения по породам. Вертикальные напряжения в боках выработки уменьшаются, но абсолютные горизонтальные напряжения в почве выработки увеличиваются, наиболее существенно это происходит при наличии в почве выработки прочного слоя.

Многовариантное моделирование напряженного состояния прочного слоя, включающее вариации отношений: ширины выработки к мощности прочного слоя (a/m_1), упругих параметров прочного слоя и нижележащей толщи пород (E_1/E_2), а также глубины заложения подготовительной выработки H, – позволило более детально изучить закономерности

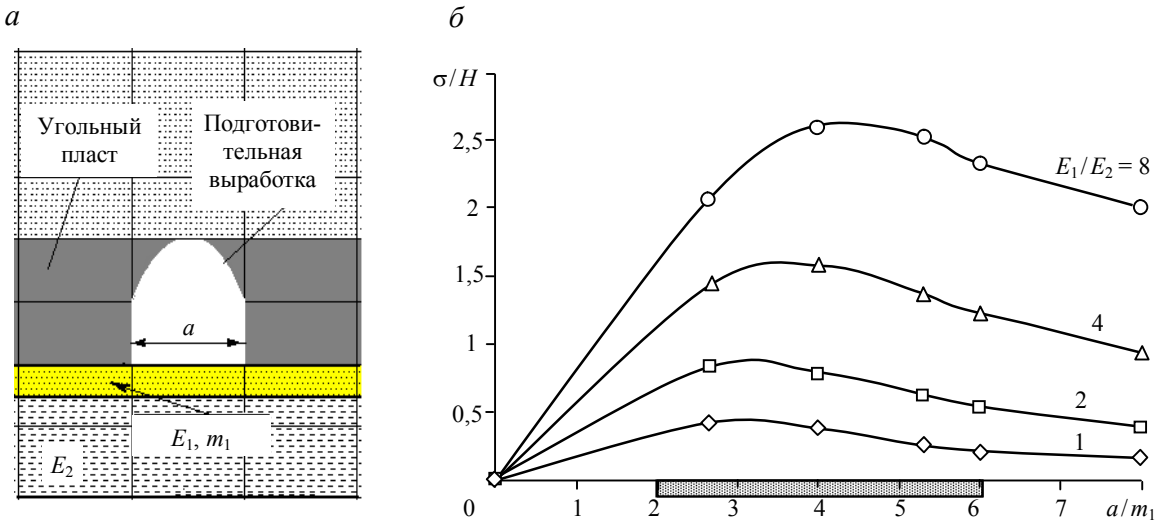


Рис.1. Модель системы «подготовительная выработка – массив пород» (*а*)
и график изменения напряжений в прочном слое подготовительной выработки (*б*)

распределения напряжений в прочном слое. В результате исследований установлено, что в отличие от вертикальных напряжений, горизонтальные в прочном слое (σ) весьма чутко реагируют на изменения параметров слоистости и могут служить прогностическим признаком рассматриваемых видов горных ударов [3]. При этом горизонтальные напряжения характеризуют изгиб слоя. По результатам моделирования построена номограмма (рис.1) для определения горизонтальных напряжений (σ/H), действующих в прочном слое на его нижней границе под серединой выработки. Можно заметить, что наибольшие напряжения возникают при отношении ширины выработки (a) к мощности прочного слоя m_1 от 2 до 6. Этот интервал почти совпадает с тем, который был определен на основе фактических данных о настоящих горных ударах, и поэтому может считаться теоретическим обоснованием этих значений.

Рассмотрено также влияние на напряжения в прочном слое других факторов. Когда прочный слой залегает на некотором удалении от поверхности почвы выработки, горизонтальные напряжения на его нижней границе уменьшаются. По мере увеличения этого расстояния горизонтальные напряжения на верхней и нижней границах прочного слоя стремятся принять одинаковые значения, при этом существенно уменьшается изгиб слоя и, соответственно, опасность возникновения горного удара. Примерно такая же закономерность наблюдается при изменении угла падения пород. Причем уже при 5-6° исчезает характерный изгиб прочного слоя.

Рассмотрен также часто встречающийся случай, когда в почве выработки залегает угольный пропласток. При его залегании непосредственно под прочным слоем горизонтальные напряжения в прочном слое на его нижней границе могут возрасти в 3 раза и более относительно случая без пропластка. При залегании последнего на расстоянии, примерно равном ширине выработки, напряжения в прочном слое такие же, как и в случае без пропластка.

Описанные результаты моделирования были получены на основе использования модели «нетронутого породного массива», в котором действует лишь боковой отпор по А.Н.Диннику [8]. Вместе с тем исходное напряженное состояния массива может характеризоваться и другим соотношением вертикальных и горизонтальных напряжений. При увеличении коэффициента бокового отпора горизонтальные напряжения в прочном слое возрастают. При этом соразмерно увеличиваются напряжения на нижней и верхней границах прочного слоя.

Исследовано также влияние на напряженное состояние породного массива горнотехнических факторов, которые могут инициировать горные удары с разрушением почвы в подготовительных выработках. На сопряжении подготовительных выработок напряжения на 15-20 % превышают уровень γH (γ – плотность пород, H – глубина горных работ). В то же время увеличенная площадь обнажения создает условия для большего изгиба и, соответственно, на сопряжениях опасность рассматриваемых ударов увеличивается. Оценка напряженного состояния пород при сближении параллельных (парных) выработок, пройденных по одноименному угольному пласту, под которым залегает прочный слой породы, показала, что и вертикальные напряжения в боках выработок и горизонтальные в прочном слое под выработкой увеличиваются при расстояниях между выработками менее 10 их условных радиусов.

Влияние на распределение напряжений в породном массиве геологических (разрывных) нарушений следует рассматривать в определенной системе блочной структуры массива [1]. При этом инициирующим фактором подвижек блоков помимо возможных тектонических сил являются горные работы.

Проведение очистной выработки существенным образом перераспределяет напряжения в породном массиве. Поэтому важно оценивать эти изменения применительно к случаям заложения подготовительных выработок в зонах влияния очистных. Кроме того, достаточно много случаев горных ударов зарегистрировано и при ведении очистных выработок. Удары возникают и в почве и в кровле очистной выработки, непосредственно у груди забоя [6, 8].

Моделирование выполнено с использованием ПК «Plaxis». Размеры модели 1000×1000×1000 м (рис.2) Решалась упругопластическая задача о напряжениях в объемной области, на границах которой перемещения в перпендикулярном направлении запрещены. Верхняя граница свободна (перемещения и усилия равны нулю). Модель представлена шестью слоями. Сверху слой наносов 20 м (слой 7 на рис.2), далее аргиллиты (200 м, слой 6), алевролиты (800 м, слои 3, 4) и песчаник 200 м (слой 8). В породах алевролита залегает угольный пласт (слой 1), мощность которого варьировали от 2 до 8 м. В рамках модели изменяли глубину залегания угольного пласта от 300 до 900 м.

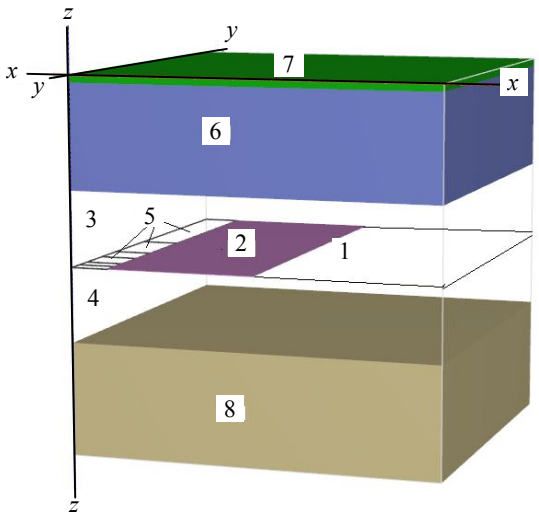


Рис.2. Модель массива горных пород, вмещающего очистную выработку

Последовательно моделировался отход лавы от разрезной печи. Стадии отхода показаны на рис.2 позиция 5: сначала 50 м, затем 100 м и до границы модели 1000 м. Ввиду симметричности ситуации относительно центральной линии очистного столба, рассмотрена половина модели (соответственно длина лавы размером в 2 раза меньше). Физико-механические характеристики пород (плотность γ, сцепление С, угол внутреннего трения φ), используемые при моделировании, приняты на основе исследований ВНИМИ [8]:

Породы	γ, т/м^3	С, МПа	φ
Наносы	1,5-2	0,001-0,1	25-30°
Аргиллиты	2,0-2,2	1-8	28-30
Алевролиты	2,0-2,5	4-15	28-30
Песчаники	2,1-2,6	4-25	25-35
Уголь	1,6-2,0	0,5-2	25-30

Коэффициент Пуассона для всех типов пород принят равным 0,3.

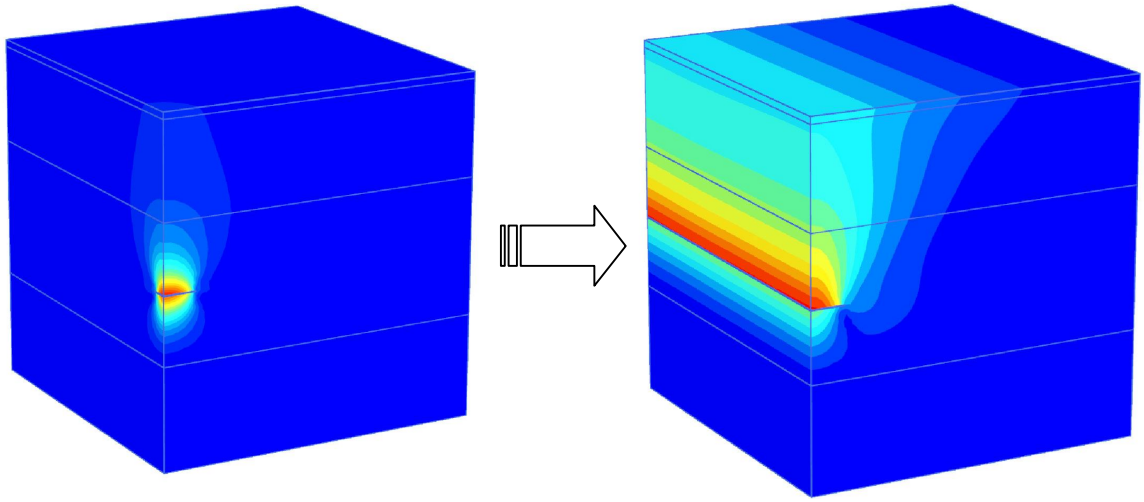


Рис.3. Динамика распределения максимальных напряжений при увеличении длины очистного столба

Повышение надежности расчетов о напряженном состоянии пород обеспечивается сравнением деформационного процесса при отработке лавы с данными о сдвижении пород. Эти данные содержатся в «Правилах охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» [7] (далее Правила…). Общая деформационная картина поэтапной отработки столба приведена на рис.3. Показано моделирование полных смещений при отработке лавы с длиной очистного забоя 200 м. Мощность угольного пласта 2 м, глубина ведения работ 500 м. В соответствии с «Правилами…» вертикальные смещения (оседания) на земной поверхности не должны превышать 0,8 м. Это значение принималось в качестве граничного условия при моделировании картины деформированного состояния пород для указанных параметров лавы.

С увеличением отхода забоя лавы от разрезной печи (монтажной камеры) область влияния лавы возрастает, соответственно, увеличивается и ширина зоны опорного давления L (рис.3). Этот процесс будет иметь место при отходе забоя лавы от монтажной камеры до условий полной подработки [3].

По результатам расчетов построены графики изменения ширины зоны опорного давления L в зависимости от глубины разработки H. На рис.4 показаны эти изменения для лавы длиной 200 м.

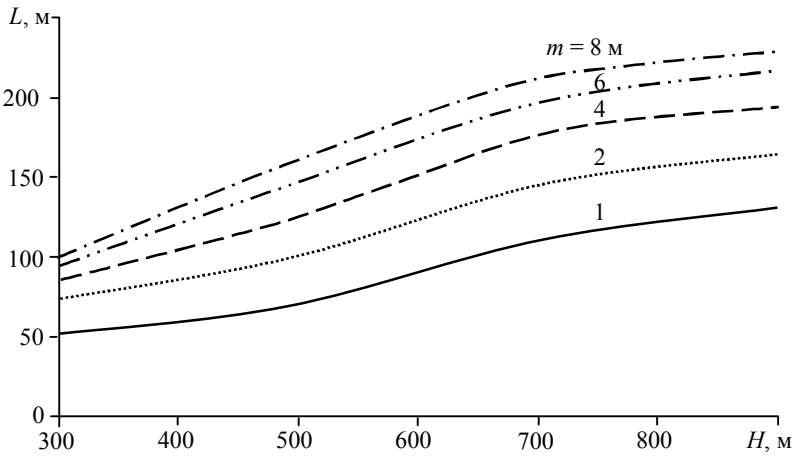


Рис.4. График изменения ширины зоны опорного давления для лавы длиной 200 м при разной мощности угольного пласта

Сопоставление полученных результатов с нормативными данными [3] обнаруживает логическую связь. Так, при $H = 500$ м, мощности угольного пласта $m = 4$ м для длины лавы 100 м получаем ширину зоны опорного давления 80,5 м, для 200 м – 125 м, а для 300 м – 165,8 м. По нормативу $L = 75$ м. Это еще раз подчеркивает, что нормативные величины рассчитывались исходя из существовавшей на то время длины лав около 100 м.

И наконец, необходимо учитывать такой фактор, как скорость проведения очистной выработки. Современное состояние подземной разработки угольных пластов в России характеризуется переходом на интенсивный способ добычи, при котором в шахте, как правило, отрабатывается лишь одна лава, но ее параметры существенно отличаются от используемых относительно недавно. Так, длина очистного забоя лавы увеличилась в 1,5-2,0 раза и составила 250-300 м, длина самой лавы достигает 2 км и более. При этом суточная нагрузка на забой возросла на порядок – до 20 тыс.тонн, что приводит к суммарному подвиганию очистного забоя за месяц на 300-400 м.

В этих условиях существенно меняется характер деформирования и сдвижения массива горных пород. При высоких скоростях разрушение кровли происходит с большим динамическим эффектом за счет увеличенных пролетов обрушения. Ряд аварий на шахтах России являются этому подтверждением (http://miningwiki.ru/wiki/). Можно утверждать, что в большинстве случаев рост скорости отработки продуктивного пласта ведет к более выраженной дискретности процесса обрушения. Вместе с тем при определенных обстоятельствах (сочетание мощности отрабатываемого пласта и слоев кровли, а также прочностных свойств пород) может происходить плавное опускание кровли. Понятия «малая» скорость подвигания забоя и «высокая» условны, и их следует дифференцировать относительно горно-геологических условий. Можно также сказать, что для определенных геологических и горнотехнических условий существует критическая, или оптимальная, скорость подвигания очистного забоя. Когда скорость подвигания очистного забоя невысокая и существенно меньше скорости разрушения подрабатываемого массива пород, т.е. когда при каждом условном шаге подвигания лавы полностью (с учетом реологических факторов) реализуется процесс разрушения массива, можно говорить об отсутствии влияния скорости подвигания очистного забоя на конечные деформации в массиве и на земной поверхности, а также на нагрузки в краевых частях угольного пласта.

Надо заметить, что невысокие скорости подвигания очистных забоев (около 100 м) использовались до 90-х годов прошлого столетия и ввиду незначительного влияния на процесс деформирования массива горных пород этому фактору не придавалось большого внимания. При превалировании скорости подвигания очистного забоя происходит уменьшение и общей продолжительности процесса сдвижения и, соответственно, деформаций на земной поверхности. Что касается напряжений в приконтурных областях очистной выработки (опорное давление), то при высоких скоростях в слоистом массиве с относительно прочными породами ($\sigma_{сж} > 30$ МПа) кровля разрушается более крупными блоками. Соответственно, они «берут» на себя большие нагрузки и создают повышенное давление на приконтурные области выработки – проявляется эффект зависания консоли.

Очевидно, что одна из главных ролей в этом временно́м процессе принадлежит ползучести с учетом прочности пород. Моделирование ползучести пород можно выполнить с использованием метода переменных параметров упругости и закономерностей деформирования пород, определенных в результате натурных исследований (наблюдений). При этом кривые ползучести следует получить на основе обратных расчетов с применением общих закономерностей ползучести для различных видов напряженного состояния пород.

Маркшейдерско-геомеханическим службам предприятий необходимо учитывать ход и последствия этих процессов для совершенствования методик наблюдений за сдвижением массива горных пород, в том числе земной поверхности, и создания основы прогноза и предотвращения негативных явлений.

Покажем некоторые результаты разработанного метода моделирования, который воплощен в программный комплекс «НЕДРА» [5]. Решение задачи разбивается на две: одна – это моделирование собственно подвигания очистного забоя и его скорости, вторая – моделирование деформирования массива горных пород с учетом фактора времени.

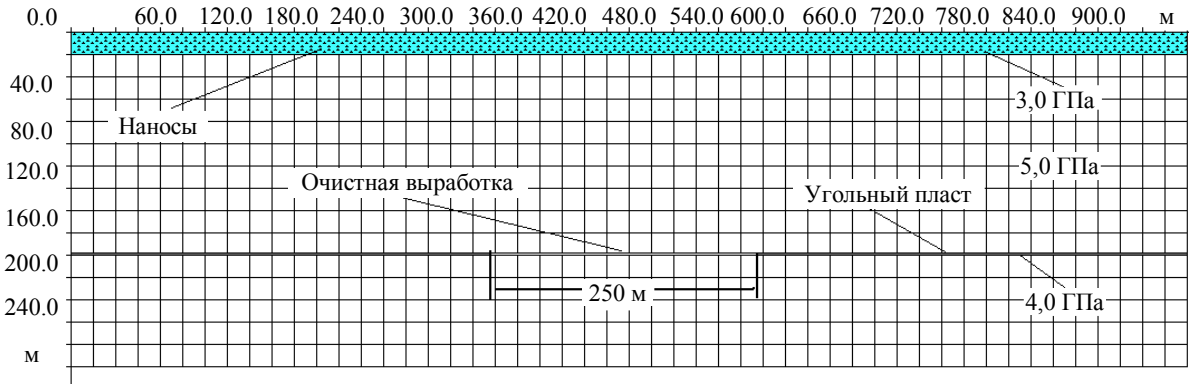


Рис.5. Модель массива горных пород, вмещающего очистную выработку

Первый вопрос является техническим и решается путем включения в модель податливых элементов (ПК «НЕДРА» реализует метод конечных элементов). Отработка лавы (заходок) моделируется присвоением элементам, входящим в область угольного пласта и впоследствии вынимаемым, значений модуля упругости на 3 порядка меньшим, чем до выемки. При этом скорость определяется отношением размера заходки ко времени, затраченном на ее проходку. Контроль смыкания кровли с почвой осуществляется автоматически и, следовательно, соблюдается корректность решения задачи по этому фактору.

Учет фактора времени при моделировании деформирования пород связан со скоростью проведения очистной выработки и должен быть отнесен лишь к области влияния горных работ.

Приведем примеры моделирования, в том числе с учетом временного процесса деформирования и разрушения подработанных пород и скорости подвигания очистного забоя. Последовательно на одной модели рассмотрены статические и временные задачи. Структурная модель, ее размеры и упругие параметры представлены на рис.5.

Прочности пород задавались сцеплением: наносов 2 МПа; алевролитов (аргиллитов) 3-5 МПа; угля 2 МПа. Предел длительной прочности принимали от значений мгновенной прочности с коэффициентом уменьшения от 1,5 до 2,0. Использовалась конечно-элементная модель, содержащая около 20000 элементов.

Для сравнения на рис.6 показаны различные варианты решения задачи о разрушении пород. Как следует из результатов моделирования, картины разрушений в статике носят симметричный характер, но при учете динамики подвигания забоя они приобретают асимметрию. При упропластическом решении разрушения приурочены к контуру выработки, причем в средней части они возникли от растягивающих напряжений, а по краям – от сдвигающих усилий.

Из рассмотрения решения вязкоупругопластической статической задачи (рис.6, *в*) при скорости подвигания забоя 1 м/сут видно, что зона разрушений существенно увеличилась. Фиксируется нарастание (увеличение) зоны разрушений (движение лавы слева направо). Картина разрушений явно отличается от приведенных выше, при этом она несимметрична.

В варианте рис.6, *г* демонстрируется поведение массива горных пород при скорости на порядок выше (10 м/сут). Надо заметить, что такие скорости уже являются нормой для многих шахт. Как видно, площадь разрушения небольшая. Это как раз свидетельствует о том, что при высоких скоростях происходит как бы задержка процесса разрушения и накопление энергии в породах кровли (нависающей консоли) и эта ситуация отвечает относительно небольшому пролету выработки. При увеличении пролета выработки (отхода от разрезной печи) произойдет обрушение консоли, и при этом форма разрушения будет иметь динамический характер.

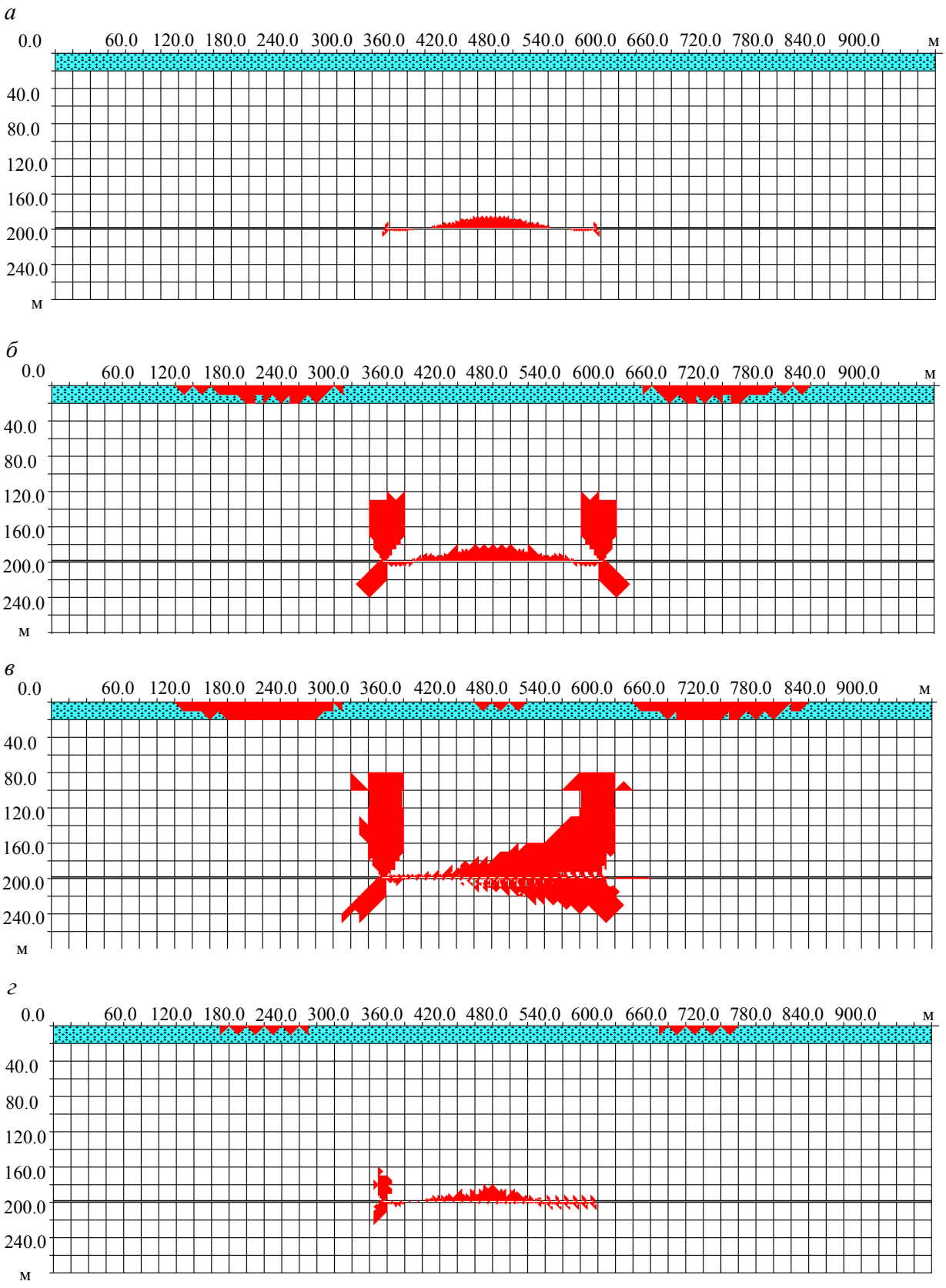


Рис.6. Разрушения в массиве горных пород при отработке лавы: *а* – плоская упругая задача; *б* – плоская упругопластическая задача; *в*, *г* – плоская вязкоупругопластическая задача, моделирование отхода лавы от разрезной печи (*в* – скорость 1 м/сут; *г* – скорость 10 м/сут)

Таким образом, при высокой скорости подвигания забоя приконтурная область может не претерпевать значительных разрушений относительно случаев, когда лава движется с малой скоростью. Однако при этом в краевой части накапливается большая энергия упругих деформаций, способная привести к разрушениям с динамическим эффектом. Остановки лавы также опасны и могут привести к обрыву зависшей консоли (слоев пород кровли) с динамическим эффектом значительно большим, чем при малых скоростях подвигания лавы.

Рассмотренные вопросы о причинах возникновения одного из видов горных ударов дают основу для конкретизации исследований при разработке практических рекомендаций в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Батугина И.М.* Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников / И.М.Батугина, И.М.Петухов. М.: Недра, 1988. 166 с.

2. Внезапные разрушения почвы и прорывы метана в выработки угольных шахт / А.М.Морев, Л.А.Скляров, И.М.Большинский, С.М.Клойзнер, В.Т.Водолазский, В.В.Шерсткин. М.: Недра, 1992. 174 с.

3. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам (РД 05-328-99) // Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах: Сборник документов. Серия 05. Выпуск 2 / Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. М., 2011. С.4-119.

4. Каталог динамических разломов почвы горных выработок на угольных шахтах (дополнение к каталогу 1983 г.) / ВНИМИ. Л., 1986. 88 с.

5. *Мустафин М.Г.* Геомеханическая модель системы «выработка – вмещающие породы» и ее использование при прогнозировании динамических проявлений горного давления // Горная геомеханика и маркшейдерское дело / ВНИМИ. СПб, 1999. С.21-25.

6. *Мустафин М.Г.* Формирование техногенных выбросоопасных зон в угольных пластах // Записки Горного института. 2013. Т.204. С.62-65.

7. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / ВНИМИ. СПб, 1998. 237 с.

8. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: Справочное пособие / И.М.Петухов, А.М.Линьков, В.С.Сидоров и др. М.: Недра, 1992. 256 с.

9. *Zienkiewicz O.C.* The birth of the finite element method and of computational mechanics // Int.J. Numer. Meth. Eng. 2004. N 60. P.3-10.

REFERENCES

1. *Batugina I.M*., *Petuhov I.M.* Geodinamicheskoe rajonirovanie mestorozhdenij pri proektirovanii i jekspluatacii rudnikov (*Fields geodynamic zoning for mine planning and exploitation*). Moscow: Nedra, 1988, p.166.

2. *Morev A.M*., *Skljarov L.A*., *Bol'shinskij I.M*., *Klojzner S.M*., *Vodolazskij V.T*., *Sherstkin V.V.* Vnezapnye razrushenija pochvy i proryvy metana v vyrabotki ugol'nyh shaht (*Sudden ground destruction and methane uprush in coal mines*). Moscow: Nedra, 1992, p.174.

3. Instrukcija po bezopasnomu vedeniju gornyh rabot na shahtah, razrabatyvajushhih ugol'nye plasty, sklonnye k gornym udaram (RD 05-328-99) (*Instructions for safe mining operations in coal mines with frequent rock bursts*). Preduprezhdenie gazodinamicheskih javlenij v ugol'nyh shahtah: Sbornik dokumentov. Vol.05. Iss.2. Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti. Moscow, 2011, p.4-119.

4. Katalog dinamicheskih razlomov pochvy gornyh vyrabotok na ugol'nyh shahtah (dopolnenie k katalogu 1983 g.) (*A record of dynamic faults in coal mine openings* (supplement to the catalog 1983)). VNIMI. Leningrad, 1986, p.88.

5. *Mustafin M.G*. Geomehanicheskaja model' sistemy «vyrabotka – vmeshhajushhie porody» i ee ispol'zovanie pri prognozirovanii dinamicheskih projavlenij gornogo davlenija (*A geomechanical «mine opening – host rock» model and its use for dynamic rock pressure prediction*). Gornaja geomehanika i markshejderskoe delo. VNIMI. St Petersburg, 1999, p.21-25.

6. *Mustafin M.G.* Formirovanie tehnogennyh vybrosoopasnyh zon v ugol'nyh plastah (*Formation of man-caused outburst zones in coal seams*). Zapiski Gornogo instituta. 2013. Vol.204, p.62-65.

7. Pravila ohrany sooruzhenij i prirodnyh ob'ektov ot vrednogo vlijanija podzemnyh gornyh razrabotok na ugol'nyh mestorozhdenijah (*Rules of structures and natural objects protection from harmful influence of underground coal mining*).VNIMI. St Petersburg, 1998, p.237.

8. *Petuhov I.M.*, *Lin'kov A.M.*, *Sidorov V.S.* et al. Raschetnye metody v mehanike gornyh udarov i vybrosov (*Calculation methods in mechanics of rock bursts and uprushes*). Moscow: Nedra, 1992, p.256.

9. *Zienkiewicz O.C.* The birth of the finite element method and of computational mechanics. Int.J. Numer. Meth. Eng. 2004. N 60, p.3-10.

THE MECHANISM OF ROCK BURST LEADING TO GROUND DESTRUCTION OF MINE OPENINGS

M.G.MUSTAFIN, *Dr. of Engineering Sciences*, *Head of Department*, *mustafin_m@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

The article deals with the main issues of studying of one type of rock bursts which lead to gound destruction of coal mine openings. The research is focused on rock burst prediction. Some cases of rock bursts are analised. The paper points out factors affecting this kind of rock failure. It also presents some simulation models and numerical examples. The results of the research show that it is possible to plan safe mining operations under different mining and geological conditions.

Key words: rock bursts, mine opening, rock mass, coal seam, stress-strain state of rocks, simulation, rock movement, zone of high rock pressure.