

Расчет напряженного состояния массива в условиях отработки сближенных угольных пластов с плавным опусканием пород кровли

В. М. Серяков^{1}*

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: vser@misd.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы расчета напряженного состояния массива горных пород при отработке пластовых месторождений, деформации кровли которых происходят путем плавного смещения в очистное пространство. Особое внимание уделяется моделированию условий взаимодействия пород кровли и почвы выработок, оказывающее определяющее влияние на характер распределения и величины напряжений в зонах опорного давления и разгрузки. Проведен анализ особенностей перераспределения напряжений во вмещающих породах при последовательной отработке сближенных угольных пластов. Даны рекомендации по выбору технологических параметров их совместной отработки с учетом взаимовлияния геомеханических процессов на выемочных участках.

Ключевые слова: массив горных пород, пластовые месторождения, выработка, кровля, почва, контактное взаимодействие, напряжения, математическое моделирование, сближенные пласты, распределение напряжений

Stress state analysis of rock mass in mining close-spaced coal seams with smooth roof subsidence

V. M. Seryakov^{1}*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: vser@misd.ru

Abstract. The author analyzes stress state of rock mass in mining bedded deposits with roof rock deformation in the course of the smooth subsidence of the roof in the mined-out area. The analysis focuses on modeling roof and floor interaction in roadways, which governs the distribution and values of stresses in the zones of the abutment pressure and stress relief. The features of stress redistribution in enclosing rock mass during successive mining of closely spaced coal seams are studied. The recommendations on selection of the parameters of technology for joint mining of closely spaced coal seams with regard to mutual effect of mining-induced geomechanical processes are given.

Keywords: rock mass, bedded deposits, roadway, roof, floor, contact interaction, stresses, mathematical modeling, closely spaced seams, stress redistribution

Введение

Отработка сближенных угольных пластов происходит в сложных геомеханических условиях, возникающих вследствие взаимовлияния зон опорного давления и зон разгрузки, формирующихся в окрестности выработанных про-

странств нескольких пластов. Для обеспечения безопасной и эффективной организации горных работ в сближенных угольных пластах необходимо в первую очередь достоверное обоснование очередности отработки пластов и взаимного расположения целиков, оставляемых в выработанном пространстве. [1-5]. При математическом моделировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районах ведения очистных работ в сближенных пластах требуется корректно учесть основные факторы, определяющие характер деформирования угольных пластов и вмещающих пород. Отличительной особенностью выемки угольных пластов является их незначительная мощность по сравнению с мощностью вмещающей толщи. При развитии горных работ распределение напряжений в зоне отработки во многом определяется характером взаимодействия кровли и почвы в очистном пространстве.

При мощности обрабатываемых пластов менее 2 м в случае залегания в кровле пород средней и высокой крепости часто происходит их небольшое разрушение и плавное смещение в выработанное пространство до контакта с породами почвы. Для реализации плавного опускания кровли в качестве специальной крепи применяют костры, устанавливаемые в выработанном пространстве в один или в два ряда в шахматном порядке. В результате некоторого смятия костров кровля плавно опускается и ложится на почву, которая также деформируется в выработанное пространство. Плавное опускание применяется при разработке весьма тонких пластов, когда породы кровли способны опускаться путем сдвигов большого числа блоков. В результате этого на расстоянии 20 – 30 м от забоя кровля опускается на почву. Этот процесс реализуется в обрабатываемых пластах по мере их выемки и оказывает определяющее влияние на напряженно-деформированное состояние массива в районах ведения очистных работ [6].

Методы и материалы

Для описания механического взаимодействия границ выработанного пространства, смещения которых ограничены мощностью обрабатываемого пласта, предлагается использовать подход, в котором матрица жесткости расчетной системы формируется для исходного массива горных пород. Моделирование проходки выработки происходит с помощью использования итерационного процесса метода начальных напряжений, в результате применения которого в элементах, попадающих в объем выработки, все напряжения обращаются в ноль [7,8]. На всех этапах расчета используется исходная матрица жесткости [9]:

$$\{F\}_{\{\sigma^n\}} = \int_V [B]^T \{\sigma^n\} dV \quad \{\sigma^n\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x^0 \\ \sigma_y^0 \\ \tau_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

В (1) $\{F\}_{\{\sigma^n\}}$ - вектор узловых сил, обусловленных начальными напряжениями; $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ - нормальные и касательные компоненты напряжений, действующих в элементах выработки до начала ее проходки.

Ограничение смещений границ отработанного пространства мощностью пласта приводит к тому, что вертикальная нормальная деформация конечного элемента ε_n , расположенного в отработанном пространстве, не превышает величину -1. Если $\varepsilon_n = -1$, то реализуется контакт границ кровли и почвы. Для выполнения условия $\varepsilon_n = -1$ в [10] предложен итерационный процесс, также основанный на методе начальных напряжений. Его применение основано на матрице жесткости расчетной системы, сформированной для нетронутого горными работами массива горных пород:

$$\{F\}_{\{\varepsilon_n\}} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon^H\} dV \quad (2)$$

Где $\{\varepsilon^H\} = \varepsilon_p - \varepsilon_{кр}$, ε_p - расчетное значение нормальной деформации, $\varepsilon_{кр}$ - критическая величина нормальной деформации, равная -1, а матрица [D] определяется из следующего соотношения между напряжениями и деформациями

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} \nu/(1-\nu)\varepsilon_y \\ \varepsilon_y \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Применение разработок, изложенных в [9] и основанных на использовании матрицы жесткости, соответствующей исходному массиву горных пород, позволяет осуществлять расчет напряженно-деформированного состояния с учетом последовательности ведения очистных и закладочных работ. Важно реализовать эту возможность и при математическом моделировании отработки сближенных угольных пластов. Последовательность ведения очистных работ может оказать существенное влияние на характер распределения и величины напряжений в зонах опорного давления и разгрузки. Проводя расчеты и анализ напряженного состояния массива для разных вариантов отработки сближенных пластов, можно делать выводы о наиболее безопасной последовательности их выемки с геомеханической точки зрения.

Для расчетов напряженно-деформированного состояния массива при отработке сближенных пластов с учетом этапности отработки необходимо предусмотреть последовательность его определения в соответствии с принятым порядком ведения горных работ. После расчета первого этапа отработки необходимо сохранить значения смещений, деформаций и напряжений во всех точках расчетной области, полученных с помощью описанного выше алгоритма. На втором этапе расчета итерационный процесс нахождения решения продолжается. В конечных элементах очистного пространства, образуемого на этом этапе, используется тот же алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния, учитывающий контакт кровли и почвы в выработанном пространстве. В конечных элементах расчетной области, находящихся в области выработки первого этапа, на втором этапе продолжается реализация итерационного процесса нахождения решения (1)–(2). Для его реализации также используется вся расчетная информа-

ция, полученная на первом этапе расчета: массивы перемещений, всех компонент напряжений, начальных напряжений и начальных деформаций, массив элементов, в которых произошел контакт кровли и почвы. Второй этап расчета заканчивается после того как смещения точек расчетной области для следующих друг за другом итераций станут отличаться на величину меньшую, чем заданное малое число.

На третьем и последующих этапах моделирования описанный алгоритм повторяется. При проведении соответствующей модернизации программного обеспечения, задавая последовательность отработки пластов, их геометрические размеры, возможен расчет напряженно-деформированного состояния сближенных угольных пластов с учетом последовательности их отработки при плавном опускании кровли в выработанное пространство.

Результаты

Применим предложенный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния пород, учитывающий последовательность отработки сближенных пластов, для горнотехнических условий, показанных на рис.1. Моделируется последовательная выемка двух горизонтальных угольных пластов, расположенных в 30 метров друг от друга. Рассматриваются два варианта отработки. Первый вариант содержит три этапа выемки, два в вышележащем и один в нижележащем пластах. Во втором варианте – два этапа отработки. Первый этап такой же, как и в первом варианте, второй этап моделирует одновременную выемку запасов в обоих пластах, соответствующую второму и третьему этапам отработки первого варианта. Таким образом, конфигурация выработанного пространства после выполнения обоих вариантов одинаковая.

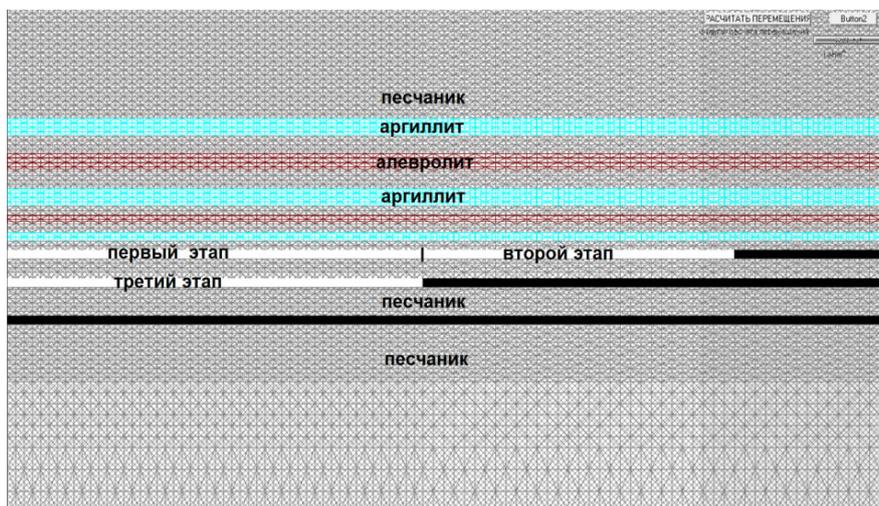


Рис. 1. Схема расположения вмещающих пород и угольных пластов в слоистом массиве при моделировании последовательности отработки

Глубина залегания верхнего пласта 300 м. Мощности пластов одинаковы и равны 4 м. Исходное напряженное состояние обусловлено только весом пород:

$\sigma_y^0 = -\rho H$; $\sigma_x^0 = -\nu \rho H / (1 - \nu)$; $\tau_{xy}^0 = 0$. Здесь - ρ - объемный вес пород; H – расстояние до земной поверхности. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Верхняя граница расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений v и касательная компонента тензора напряжений τ_{xy} . Налгающая породная толща представлена чередующимися слоями песчаников, аргиллитов и алевролитов. Их механические свойства приняты следующими: для песчаников – модуль Юнга $E = 2500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$; для алевролитов $E = 1800$, $\nu = 0.3$; для аргиллитов $E = 2500$ МПа, $\nu = 0.28$. Для отработываемых пластов $E = 300$ МПа; $\nu = 0.35$. Объемный вес всех пород равен 0.03 МН/м³.

Для представления об основных особенностях перераспределения напряжений по мере развития горных работ были рассмотрены особенности формирования вертикальных напряжений. На рис. 2 приведены их распределения в районе ведения горных работ после выполнения первого этапа отработки, одного и того же для двух рассматриваемых вариантов.

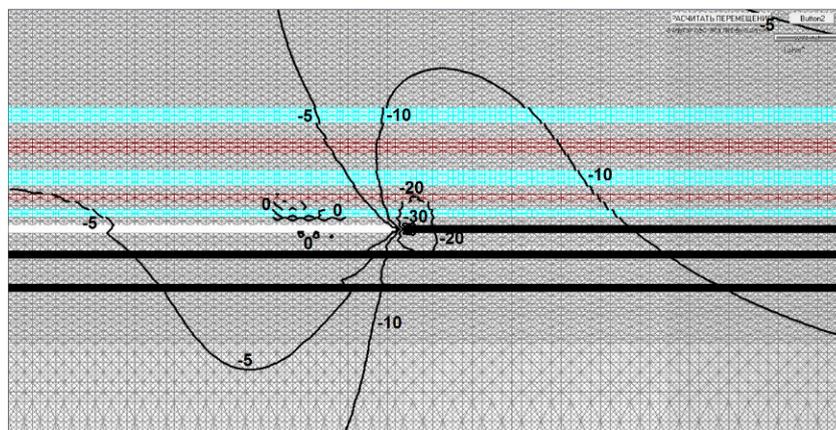


Рис. 2. Изолинии вертикальных напряжений после завершения первого этапа отработки

Основные особенности формирования зон концентрации и зон разгрузки вертикальных напряжений при контакте кровли и почвы были установлены ранее [10,11]. Среди них стабилизация уровня напряжений в зонах опорного давления при увеличении размеров выработанного пространства; возможность расчета процесса восстановления горного давления над отработанной частью угольного пласта.

Рис. 3 дает представления о распределении вертикальных напряжений в окрестности отработанного пространства после выполнения второго этапа отработки для первого варианта ведения работ. Основная особенность, вносимая учетом последовательности отработки – сохранение зоны опорного давления, сформированной в массиве после первого этапа выемки. Хотя уровень напряжений в ней значительно уменьшается, но факт существования зоны повышенных напряжений необходимо принимать во внимание при дальнейшем ведении

очистных работ Действительно, после выполнения третьего этапа отработки в этой зоне происходит существенное увеличение уровня напряжений (рис. 4).

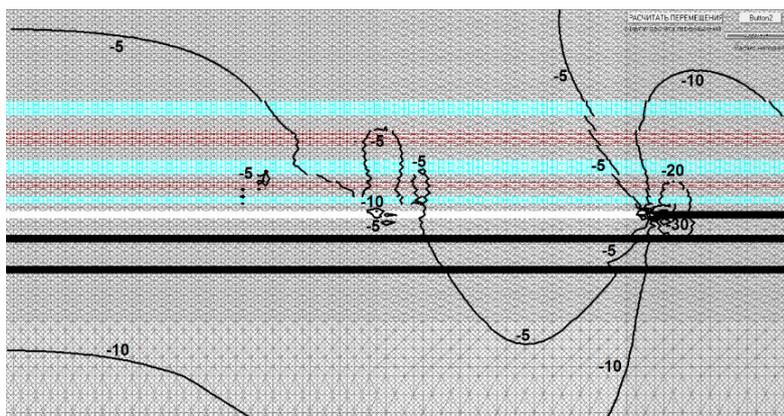


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений после проведения второго этапа отработки вышележащего пласта

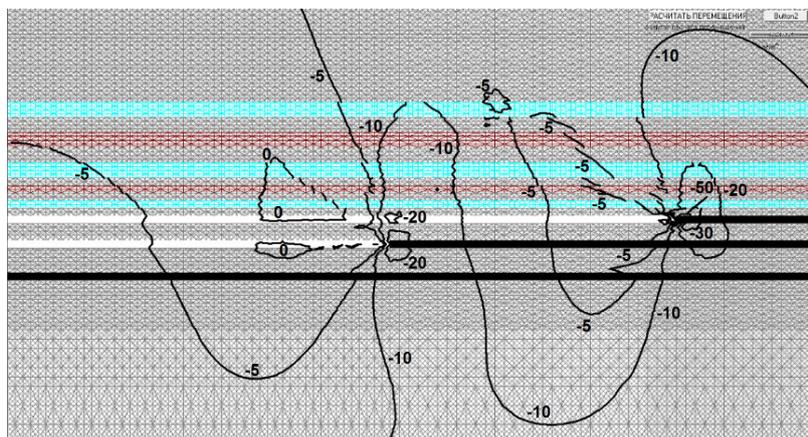


Рис. 4. Изолинии вертикальных напряжений после выполнения третьего этапа отработки

В остальном характер распределения вертикальных напряжений соответствует установленным закономерностям их поведения при учете контакта почвы и кровли выработанного пространства. Отработка нижележащего пласта в зоне разгрузки от выемки нижележащего пласта приводит к более чем в два раза меньшему уровню напряжений в зоне его опорного давления.

Для второго варианта ведения очистных работ с одновременным выполнением второго и третьего этапов отработки качественное распределение вертикальных напряжений остается тем же, что и для первого варианта (рис. 4). В количественном же отношении происходит уменьшение уровня напряжений в зоне опорного давления вышележащего пласта. Необходимо отметить также и уменьшение зоны разгрузки массива от вертикальных напряжений за фронтом ведения очистных работ, как в вышележащем, так и в нижележащем пластах.

Заключение

1. Модернизированный программный комплекс расчета напряженно-деформированного состояния массива при отработке сближенных угольных пластов позволяет учитывать последовательность ведения горных работ.

2. Учет последовательности выемки угольных пластов дает возможность оценки напряженного состояния в зонах опорного давления, сформированных на разных этапах отработки.

3. Одновременное ведение очистных работ в сближенных пластах вызывает уменьшение уровня напряжений в зоне опорного давления вышележащего пласта по сравнению с вариантом их последовательной отработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ярошенко В. В. Обоснование параметров технологических схем отработки пологих газоносных угольных пластов в подработанных зонах. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург – 2019. – 19 с.

2. Цветков А.Б., Павлова Л.Д. Выявление закономерностей нелинейного деформирования пород при отработке свиты угольных пластов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 10. С. 324–332.

3. Пальцев А. И. Управление горным давлением при интенсивной отработке свит угольных пластов на шахтах ОАО «СУЭК-КУЗБАСС». Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2011 – 19 с.

4. Харитонов И. Л. Разработка технологии высокоинтенсивной угледобычи при доработке выемочного столба и подготовки демонтажной камеры. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 2019. – 20 с.

5. Чередник В.А. Смыкание пород кровли при отработке пологих угольных пластов в условиях ГП УК «Краснолиманская» Вестник Донецкого горного института. №1(40) 2017. С. 243–247.

6. Ягунов А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом массиве. Кемерово. Кузбасвуиздат. 2010. – 259 с.

7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

8. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.

9. Серяков В.М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологии с закладкой выработанного пространства // ФТПРПИ. - № 5. – 2014. – С. 51-60.

10. Серяков В.М. Обоснование геомеханических параметров разработки свиты пологих пластов //Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – Новокузнецк. – 2017. №3. С. 51-57.

11. Серяков В.М. Особенности формирования зон опорного давления и разгрузки при ведении очистных работ в сближенных угольных пластах //Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – Новокузнецк. – 2019. №5. С. 52-55.

© В. М. Серяков, 2022