УДК 622.831

**Д.А.ПОТЕМКИН**
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ НИСХОДЯЩЕМ ПОРЯДКЕ ОТРАБОТКИ РУДНОГО ТЕЛА ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Методом конечных элементов исследована динамика смещений рудного массива на различных этапах строительства защитного перекрытия и отработки панели. Выполнено моделирование варианта отработки нижней части панели камеры второй очереди с увеличенной высотой и шириной камер. Порядок отработки рассмотрен поэтапно, получены параметры напряженно-деформированного состояния для каждого этапа отдельно и для варианта отработки в целом. Даны качественная и количественная оценка результатов моделирования.

The finite element method investigates changes of offsets of an ore in place on different stages of construction of protective blanking and improvement of the panel. Simulation of version of improvement of a heel of the panel of the second-order chamber with an enlarged altitude and width of chambers plumps. A sequence of mining parameters of a tense – strained state for each stage separately and for version of improvement as a whole are considered stage by stage, received. Dan quality and a quantitative assessment of outcomes of simulation.

При отработке первой очереди рудного тела система предполагает отработку первоочередного участка двумя подэтажами. Первый подэтаж (верхний) высотой 22,5 м отрабатывается слоевой системой разработки с выемкой руды заходками. В вынимаемом первом слое подэтажа создается защитное железобетонное перекрытие. Второй подэтаж (нижний) отрабатывается камерной системой с самообрушением руды. Обе системы разработки являются системами с закладкой отработанного пространства твердеющими смесями. Отработка верхнего подэтажа ведется с опережением нижнего подэтажа.

Для формирования защитного перекрытия приняты следующие положения: всего в верхнем подэтаже четыре рабочих слоя. Основные параметры очистных заходок: ширина 4,75 м; высота 4,5 м. Отработка нижнего подэтажа производится под защитой закладочного массива мощностью 22,5 м, созданного при отработке верхнего подэтажа. Запасы нижнего подэтажа отрабатываются камерами с параметрами, при которых обеспечивается самообрушение руды. Параметры камеры: ширина 25 м, длина 50 м, высота 37,5 м.

При нисходящем порядке отработки рудного массива предусматривается:

- строительство защитного перекрытия-плиты мощностью 3,5 м камерами шириной 5 м (общая длина перекрытия 110 м);
- последовательная отработка четырех слоев камерами высотой 4,5 м и шириной 5 м с закладкой выработанного пространства;
- дальнейшая разработка рудного массива камерами высотой 37,5 м и шириной 25 м с закладкой выработанного пространства.

Принятые характеристики закладочного материала: модуль деформации $E = 3000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$; для бетона (защитное перекрытие): $E = 32000$ МПа, $\nu = 0{,}2$. Физико-механические характеристики пород приведены в табл.1.

Формирование защитного перекрытия проводится с использованием объемной конечно-элементной модели массива пород, которая представляет собой параллелепипед длиной 200 м, шириной 150 м и высотой 450 м. Часть массива (около 300 м от поверхности) заменена адекватной распределенной нагрузкой. Четвертичные отложения, вмещающие породы и рыхлые руды

*Таблица 1*

**Физико-механические свойства горных пород и грунтов**

| Наименование грунта-породы | Характеристики | | |
|---|---|---|---|
| | $E$, МПа | $\nu$ | $\gamma$, кН/м$^3$ |
| Третичные песчано-глинистые отложения | 200 | 0,27 | 19,2 |
| Мел (маастрихтский)<br>Мергель<br>Мел (туронский) | 6300 | 0,24 | 27,3 |
| Пески (сеноман-альбские)<br>Песчаники (волжские) – глины (оксфорд-кембриджские) – мел<br>Глины (оксфорд-кембриджские)<br>Пески (келловейские) | 480 | 0,32 | 22,6 |
| Глины (бат-байосские) | 460 | 0,34 | 28,2 |
| Известняки (карбоновые, глинистые) | 3640 | 0,29 | 29,0 |
| Руды переотложенные (слабые) | 600 | 0,26 | 34,0 |
| Алевролиты-филлиты (средней крепости) | 75000 | 0,24 | 28,0 |
| Вмещающие известняки (сланцы гидрослюдизированные – сланцы серицитовые) | 55000 | 0,26 | 29,0 |
| Руды рыхлые | 500 | 0,26 | 34,4 |

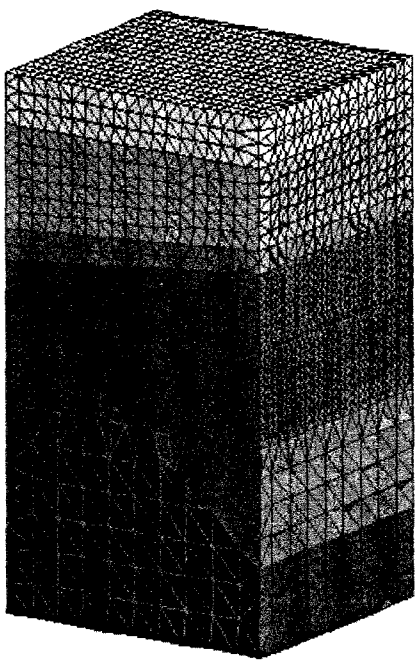


Рис.1. Общий вид объемной конечно-элементной модели

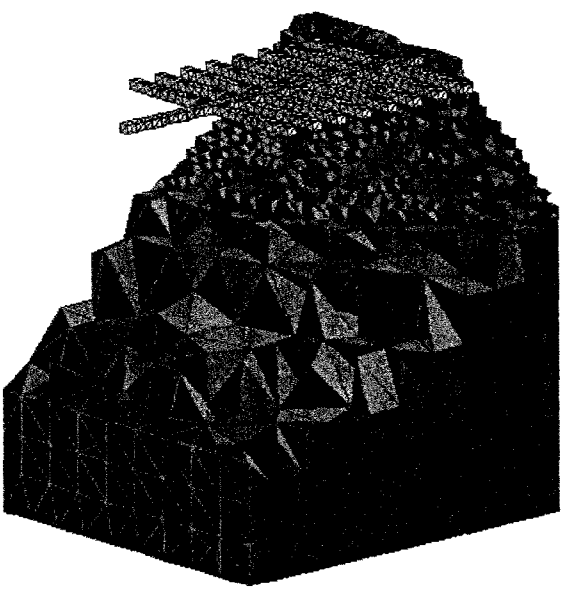


Рис.2. Схема расположения первичных камер в модели

смоделированы элементами типа «тетраэдр», общее количество элементов составило 181 тыс. Порядок отработки рудного тела – нисходящий, при восьми этапах отработки: этап 1 – строительство защитного перекрытия; этапы 2-5 – отработка четырех слоев камер; этапы 6-7 – отработка больших камер шириной 25 м и высотой 37,5 м; этап 8 – расчет суммарных смещений при нисходящем порядке отработки.

На рис.1 представлен общий вид объемной конечно-элементной модели (выделены породы и грунты с разными физико-механическими свойствами). На рис.2 по-

казана схема расположения первичных камер в модели (длинная выработка – штрек, короткие отходящие от штрека выработки – камеры).

Поле смещений при строительстве защитного перекрытия начинает формироваться сразу при проведении первичных камер. Первичные камеры представляют собой ряд параллельно пройденных выработок, отстающих одна от другой на расстоянии двух пролетов.

Максимальная величина оседания кровли составляет 0,15 м. Отметим, что в этом случае свод формируется свободно, т.е. без влияния других выработок. По мере развития горных работ рядом сооружаются новые камеры. Образующиеся при этом своды начинают оказывать взаимное влияние один на другой, что подтверждается численными значениями величин оседания: после проведения всех первичных камер максимальное оседание кровли по сравнению с одиночной камерой возросло до 0,158 м. Начинающий формироваться общий свод смещений достигает пород карбона, нижняя граница которого опускается на 0,032 м, верхняя – на 0,029 м. После закладки первичных камер начинается проведение вторичных камер, которые с одной стороны защищены бетонными целиками (заложенные первичные камеры), а с другой стороны целик остается рудным (будущие камеры третьей очереди).

Расчеты показали, что максимальное оседание рудного тела в кровле камер составило 0,115 м, что на 27 % меньше, чем при проведении первичных камер. Оседание верхней и нижней границ пород карбона при этом, соответственно, 0,016 и 0,018 м, что на 40-45 % меньше, чем при проведении первичных камер. Очевидна защитная роль бетонных целиков, сдерживающих развитие зоны смещений. Результирующие смещения от проведения камер первой и второй очереди: максимальное оседание кровли 0,161 м; оседание границ карбона: верхней 0,045 м, нижней 0,049 м. Оседание кровли выросло на 2 %, а границы пород карбона – на 35 % предыдущим этапом (проведение первичных камер). Численные значения смещений показывают, что наличие в боку камеры бетонного целика способно повлиять и на смещения в непосредственной близости от выработки, и на картину распределения смещений в общем своде.

Далее моделировался этап закладки вторичных камер и проведение камер третьей очереди. Камеры третьей очереди с обеих сторон имеют двойные бетонные целики (заложенные первичные и вторичные камеры). Максимальное оседание кровли составило 0,081 м, верхней и нижней границ слоя пород карбона – 0,010 и 0,009 м соответственно. Оседание рудного тела в кровле меньше аналогичного значения от проведения первичных камер почти на 50 %, а от проведения вторичных – на 30 %. Оседание пород карбона уменьшается в три раза по сравнению с проходкой первичных камер (без бетонных целиков) и на 70 % по сравнению с сооружением вторичных камер.

Численные значения показывают, что влияние целиков на величины смещений усиливается, так как сами целики увеличиваются в размерах и бетон является на два порядка более жестким материалом, чем руда. Итоговые величины смещений, учитывающие все этапы строительства перекрытия, составили: максимальное оседание рудного тела в своде смещений – 0,178 м; оседание нижней границы карбона – 0,060 м, верхней – 0,054 м. В табл.2 приведены численные значения параметров свода смещений по этапам строительства перекрытия.

В рудном массиве под защитным перекрытием отработка четырех слоев камер высотой 4,5 м и шириной 5 м ведется в том же порядке, что и проведение камер при строительстве защитного перекрытия, с той лишь разницей, что теперь на дальнейшее развитие свода смещений активное влияние будет оказывать наличие перекрытия. Смещения от проведения камер первого слоя составили 0,11 м, что на 30 % меньше, чем при проведении камер перекрытия (0,18 м). Это объясняется сильным сдерживающим влиянием защитного перекрытия. Также резко замедляется рост оседания нижней и верхней границ пород карбона. Прирост составил 0,041 м, что на 33 % меньше, чем при возведении защитного перекрытия.

*Таблица 2*

**Параметры свода смещений при сооружении защитного перекрытия-плиты (нисходящий порядок отработки)**

| Этапы ведения работ | Наименование и величина параметра | | |
|---|---|---|---|
| | Максимальное оседание в своде смещений, м | Оседание нижней границы толщи карбона, м | Оседание верхней границы толщи карбона, м |
| Одиночная камера | 0,150 | - | - |
| Проведение первичных камер | 0,159 | 0,0318 | 0,0289 |
| Проведение вторичных камер: | | | |
| • только от проведения вторичных | 0,115 | 0,0176 | 0,0158 |
| • итоговые, с учетом предыдущего этапа | 0,161 | 0,0493 | 0,0447 |
| Проведение камер третьей очереди: | | | |
| • только от проведения камер третьей очереди | 0,0812 | 0,0104 | 0,0093 |
| • итоговые, с учетом предыдущего этапа | 0,178 | 0,060 | 0,054 |
| ИТОГО по перекрытию | 0,178 | 0,060 | 0,054 |

*Таблица 3*

**Параметры свода смещений при нисходящем порядке отработки рудного тела**

| Этапы отработки рудного тела | Наименование и величина параметра | | |
|---|---|---|---|
| | Максимальное оседание в своде смещений, м | Оседание нижней границы толщи карбона, м | Оседание верхней границы толщи карбона, м |
| 1. Строительство защитного перекрытия-плиты | 0,178 / - | 0,060 | 0,054 |
| 2. Отработка первого под перекрытием слоя | 0,275 / 0,110 | 0,101 | 0,092 |
| 3. Отработка второго под перекрытием слоя | 0,360 / 0,109 | 0,146 | 0,0132 |
| 4. Отработка третьего под перекрытием слоя | 0,452 / 0,107 | 0,190 | 0,0172 |
| 5. Отработка четвертого под перекрытием слоя | 0,527 / 0,101 | 0,232 | 0,209 |
| 6. Отработка первой камеры шириной 25 м и высотой 37,5 м | - / 0,219 | - | - |
| 7. Отработка второй камеры шириной 25 м и высотой 37,5 м | - / 0,151 | - | - |
| 8. Итоговые смещения при нисходящем порядке отработки | 0,664 | 0,328 | 0,299 |

*Примечание.* Числитель – значение параметра итоговое, учитывающее все предыдущие этапы; знаменатель – значение параметра, учитывающее только данный этап.

Проведение камер при отработке 2, 3 и 4-го слоев дает практически одинаковый прирост к общей величине оседания – 0,110; 0,107; 0,101 м соответственно. Вследствие этого результирующая величина оседания, учитывающая предыдущие этапы, растет линейно – 0,275; 0,360; 0,425; 0,527 м после отработки камер 1, 2, 3 и 4-го слоя соответственно. Такая же закономерность наблюдается и в отношении оседания пород карбона: линейное приращение по 0,04 м при отработке каждого последующего слоя. Логично было бы ожидать более резкого уменьшения прироста, так как постоянно растет мощность толщи закладочного материала. Но наблюдается практически одинаковая величина приращения максимального смещения в своде при последовательной отработке четырех слоев: 0,110; 0,109; 0,107; 0,10 м. Это, по-видимому, объясняется тем, что модуль деформации руды и закладочного материала значительно меньше модуля деформации бетона (перекрытие). Тем не менее отметим, что проявляется тенденция снижения прироста оседаний, хотя и выраженная в миллиметрах. Численные значения смещений при отработке четырех слоев камер сведены в табл.3.

Закономерности образования свода смещений от поэтапного проведения трех очередей камер 1-го слоя теже, что и при проведении камер защитного перекрытия: образование отдельных сводов от каждой камеры, постепенное слияние их в один об-

щий свод и дальнейшее развитие геометрических размеров общего свода смещений. Поэтому представленная результирующая эпюра по форме схожа с аналогичной эпюрой для защитного перекрытия. Разница наблюдается только в величинах смещений. В целом прирост смещений при отработке четырех слоев камер значительно снижается под воздействием перекрытия. При этом общая величина суммарных смещений растет, так как при поочередной отработке слоев несколько раз подрабатывается один и тот же рудный массив.

Итоговые величины смещений для нисходящего порядка отработки четырех слоев и двух больших камер: максимальное оседание в своде смещений 0,664 м; оседание нижней и верхней границ толщи пород карбона – 0,328 и 0,300 м соответственно.

Получены следующие новые результаты, имеющие прикладное значение:

1. Установлены размеры сводов сдвижения и величины смещений массива при проходке камер и проведении закладочных работ на основных этапах строительства защитного перекрытия. Величины смещений массива, учитывающие все этапы строительства защитного перекрытия составили: максимальное оседание рудного тела в своде смещений 0,178 м; оседание нижней границы карбона 0,06 м; оседание верхней границы карбона 0,054 м.

2. Установлено, что наличие защитного перекрытия значительно снижает смещения пород в кровле выработок, с удалением от защитного перекрытия выявлена закономерность прироста смещений от отработки каждого слоя. Величина наибольшего оседания пород в своде смещений при отработке четырех слоев составила 0,527 м, оседание нижней границы толщи карбона 0,232 м и верхней 0,209 м.

3. Добыча руды большими камерами, высотой 37,5 м и шириной 25 м ниже четвертого слоя приводит к большим смещениям массива. Наибольший прирост вертикальных смещений при разработке руды первой и второй камер составил соответственно 0,22 и 0,15 м. Величина максимальных вертикальных смещений после добычи рудного тела четырьмя слоями и двумя камерами составила 0,664 м, оседание нижней и верхней границ толщи карбона 0,328 и 0,299 м соответственно.