

С.В.Кузнецов, В.Н.Одинцев,
М.Э.Слоним, В.А.Трофимов.

**УЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНЫХ
РАБОТ С ЗАКЛАДКОЙ
ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА
ПРИ РАСЧЁТАХ НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МАССИВА.**

Содержание

1. Технологическая последовательность горных работ и сущность метода последовательных циклов.	стр.3
2. Описание метода последовательных циклов.	стр.7
3. Расчёты напряжённого состояния массива горных пород с закладкой.	стр.11
Литература	стр.20

1. Технологическая последовательность горных работ и сущность метода последовательных циклов.

Разработка месторождений твёрдых подземных ископаемых с закладкой выработанного пространства получила за последние годы большое распространение. Основным назначением закладки является обеспечение возможности исключения существенных нарушений подрабатываемой земной поверхности, эффективного управления горным давлением в сложных горнотехнических условиях, создания условий безопасного ведения горных работ, а также применения комплексной механизации и эффективной технологии горных работ [82–84]. Используемые в горной практике технологические схемы разработки месторождений с закладкой выработанного пространства весьма разнообразны. Однако они имеют общую технологическую особенность – повторяющуюся в соответствии с выбранной системой разработки определённую последовательность добычных и закладочных работ, в которых можно выделить элементарный технологический цикл; выемка полезного ископаемого – закладка выработанного пространства. Закладка выработанного пространства происходит с некоторым отставанием от очистных работ, в результате чего образуется рабочее пространство, где может размещаться горное оборудование.

Формирующийся в технологических циклах блоки закладки в совокупности образуют закладочный массив. Если в качестве закладки применяются схватывающиеся, твердеющие смеси, например бетонные, то искусственный массив закладки является сравнительно монолитным и прочным [83,84]. При этом он играет важную роль в управлении горным давлением и предотвращении недопустимых сдвижений горных пород. Закладочный массив может быть представлен и слабыми, рыхлыми смесями, не допускающими каких-либо обнажений и способными противодействовать давлению налегающих толщ лишь в условиях объёмного сжатия.

Увеличение выработанного пространства в каждом технологическом цикле вызывает очередное перераспределение напряжений между массивами горных пород и сформированным ранее массивом закладки. Созданный блок закладки первоначально не нагружен давлением налегающих пород. Его напряжённое состояние формируется в процессе последующей выемки полезного ископаемого, иными словами, в процессе дальнейшего развития очистных работ. Силовое взаимодействие закладки и массива горных пород связано с их деформационными свойствами, а также с исходным напряжённым состоянием массива горных пород, полнотой закладки очистной выработки. В общем случае распределение горного давления в массиве горных пород и закладки зависит от порядка проведения и закладки очистных выработок.

Исследования закономерностей перераспределения напряжений в массиве горных пород и закладке по мере развития очистных и закладочных работ сравнительно сложные. Это главным образом связано с тем, что в рассмотрение включается массив закладки, имеющий существенно иные физико-механические свойства, чем массив горных пород. Особо важные для практики вопросы

исследуются, как правило, при помощи моделирования на эквивалентных материалах (см., например, [85,86]). Этот вид моделирования позволяет одновременно учесть несколько факторов влияния, в числе которых трещиноватость, слоистость и неоднородность массива горных пород, ползучесть горных пород и закладки, последовательность развития очистных и закладочных работ. Однако моделирование на эквивалентных материалах технически трудоёмко. Трудности возникают при варьировании параметров модели и удовлетворении критерия подобия. Поэтому при помощи моделирования на эквивалентных материалах нелегко вскрыть многообразие качественно возможных ситуаций в перераспределении напряжений в массиве горных пород и закладке и тем самым составить полную картину возможных проявлений горного давления.

При применении аналитических методов исследования перераспределения напряжений в горных породах и закладке трудности связаны с постановкой математических задач [87]. При сложившейся практике аналитическое исследование данного вопроса состоит в выборе, постановке и решении характерной математической задачи расчёта напряжённо-деформированного состояния [88-98]. При постановке этой задачи обычно считается, что, во-первых, происходят мгновенная выемка всей подлежащей экскавации области массива полезного ископаемого и одновременное вложение закладки во всю выработанную область, за исключением рабочего пространства. Во-вторых, к получившейся таким образом неоднородной среде прикладывается известная "на бесконечности" нагрузка, в результате чего в этой неоднородной среде создаётся определённое напряжённое состояние.

Геометрическая схематизация, начальные и граничные условия в этой расчётной задаче по требованию адекватности описания должны отобразить всё то многообразие горнотехнических и горно-геологических условий, которое может иметь место в действительности при постепенном развитии очистных и закладочных работ. В этой связи при постановке расчётной задачи делаются определённые предположения относительно учёта многих факторов влияния, например, таких, как: условия контактов блоков закладки друг с другом, а также с почвой и кровлей; время твердения закладки; размеры закладочных выработок и т.п. Заранее оценить справедливость вводимых предположений, вообще говоря, невозможно. Это обстоятельство ограничивает возможности аналитического исследования, снижает его ценность и в ряде случаев может поставить под сомнение справедливость сделанных на его основе выводов.

Развитие очистных и закладочных работ следует рассматривать как процесс постепенного замещения массива горных пород закладкой, в ходе которого изменяется конфигурация выработанного и заложеного пространства. Вместе с тем, поскольку физико-механические свойства закладки изменяются вследствие её нагружения и реологии, напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и закладки зависит от всех своих предыдущих состояний. Следовательно, изменение напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород и закладки по мере развития очистных и закладочных работ является своего рода "нелинейным"

процессом, отобразить который решением одной задачи механики деформируемого тела, вообще говоря, нельзя.

Процесс изменения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и закладки можно описать, если разбить его на характерные этапы. Эти этапы логично связать с технологическими циклами «выемка-закладка». Каждому из них может быть поставлена в соответствие своя характерная задача об изменении напряжённо-деформированного состояния. При этом «нагрузка» в каждой этапной задаче должна определяться по сложившемуся напряжённому состоянию массива горных пород в соответствии с условием обращения в нуль нормального и касательных напряжений на создаваемых обнажениях очистных выработок. В этом случае исследование перераспределений напряжений в массиве горных пород и закладке можно представить как решение совокупности этапных задач, в каждой из которых прямым образом учитываются особенности напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород и закладки, а также и технологические факторы влияния. Ниже представлена общая схема формализации постановки этапных задач, которую в окончательном виде можно интерпретировать как метод расчёта напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и закладки – метод «последовательных циклов».

Следует отметить, что в работах [99-102] представлены результаты расчёта напряжённого состояния массива горных пород и закладки с учётом развития горных работ, однако в этих работах не дано детального описания и обсуждения метода расчёта.

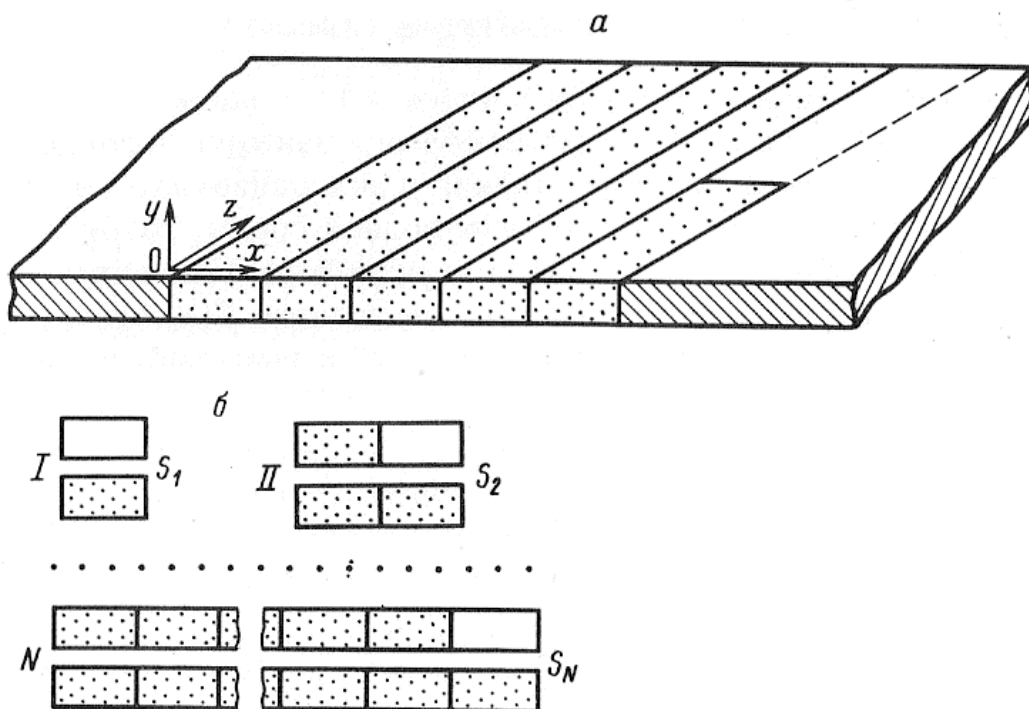


Рис. 1. Схема к расчётам по методу последовательных циклов (последовательность циклов выемка-закладка). I, II, ..., N – номера циклов.

Поскольку метод последовательных циклов учитывает в расчётах новые технологические элементы, необходимо сделать некоторые терминологические пояснения. В дальнейшем под блоками закладки выработанного пространства будем понимать предусмотренные

расчётной и технологической схемой представительные несущие элементы, из совокупности которых складывается закладочный массив. Под заходкой будем понимать очередное представительное расширение или образование нового свободного пространства в массиве горных пород после формирования блока закладки; под технологическим циклом – совокупность операций, которая включает в себя образование заходки и формирование закладочного блока.

В зависимости от характера задачи схема расчётных этапов (или расчётных циклов) может обобщать реальную технологическую схему формирования закладки, например, один цикл расчётной схемы может соответствовать нескольким реальным технологическим циклам выемка-закладка. На рис. 1.(а,б) изображена схема расчётов, в которых не рассматривалась последовательность создания закладки в направлении оси z . Представительным для заходки и закладочного блока в этом случае является элемент, дополненный пунктиром на рис. 1.а. Такое упрощение существенно снижает объём вычислений и не является принципиальным, так что в случае необходимости может быть снято.

2. Описание метода последовательных циклов.

Остановимся вначале на математической постановке квазистатической задачи расчёта напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в случае образования в нём одиночной выработки.

Пусть для однородной сплошной изотропной среды, которая для простоты будет моделировать массив горных пород, известны деформационные характеристики, обозначаемые условно $E(\sigma, t)$ (здесь σ, t – соответственно параметры “нагружения” и времени), и известно начальное напряжённое состояние σ^0_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$).

Пусть σ^I_{ij} – новое напряжённое состояние массива горных пород, которое формируется вследствие проведения в момент времени $t = t_0$ выработки с поверхностью обнажения S , а $\Delta\sigma^1_{ij}$ – изменение исходного напряжённого состояния массива, т.е.

$$\sigma^I_{ij} = \sigma^0_{ij} + \Delta\sigma^1_{ij}, \quad t_0 \leq t < \infty \quad (1)$$

Образование выработки в массиве горных пород означает, что в нём произошло перераспределение напряжений, в соответствии с чем на поверхности обнажения S проекции силового вектора $\sigma^I_{ij}n_j$ равны нулю:

$$\sigma^I_{ij}n_j|_S = 0, \quad t_0 \leq t < \infty \quad (2)$$

где n_j – компоненты единичного вектора, нормального к поверхности S .

Тогда из формул (1) и (2) следует, что на поверхности S имеют место следующие соотношения:

$$\Delta\sigma^1_{ij}n_j|_S = -\sigma^0_{ij}n_j|_S, \quad t_0 \leq t < \infty \quad (3)$$

Поскольку область изменения исходного поля напряжений при проведении выработки конечных размеров практически ограничена, то справедливо следующее условие:

$$\Delta\sigma^1_{ij}n_j|_\infty = 0, \quad t_0 \leq t < \infty \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) являются граничными условиями и условием “на бесконечности” в задаче определения изменений исходного поля напряжений, т.е. “дополнительных” напряжений. Если массив горной породы можно отнести к упругой среде, то процедура решения соответствующей задачи сравнительно проста. Это решение первой основной задачи теории упругости. Если массив проявляет нелинейные свойства, решение усложняется и находится итерационным процессом.

Пусть напряжения $\Delta\sigma^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t)$ и соответствующие деформации $\Delta\varepsilon^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t)$ представляют решение задачи при условиях (3) и

(4). Тогда искомое напряжённо-деформированное состояние массива горных пород представляется формулами

$$\begin{aligned}\sigma^I_{ij}(\mathbf{E}(\sigma^0_{ij}), t) &= \sigma^0_{ij} + \Delta\sigma^1_{ij}(\mathbf{E}(\sigma^0_{ij}), t) \\ \varepsilon^I_{ij}(\mathbf{E}(\sigma^0_{ij}), t) &= \varepsilon^0_{ij} + \Delta\varepsilon^1_{ij}(\mathbf{E}(\sigma^0_{ij}), t) , \quad t_0 \leq t < \infty\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь введено формальное исходное деформированное состояние массива горных пород ε^0_{ij} , связанное с непосредственно измеряемым исходным напряжённым состоянием σ^0_{ij} законом Гука.

Переходя к изложению метода последовательных циклов, можно сказать, что после образования первой очистной выработки (заходки) напряжённо-деформированное состояние массива горных пород определяется формулами (5).

Пусть далее производится полная закладка первой заходки (для простоты изложения исключим из рассмотрения свободное рабочее пространство). Сформированный блок закладки, естественно, первоначально не нагружен, если не рассматривать силы собственного веса. На этом расчёт перераспределений после первого цикла выемка-закладка можно считать завершённым.

Рассмотрим теперь напряжённое состояние массива горной породы и блока закладки в результате осуществления второго технологического цикла выемка-закладка. Пусть очистные работы второго цикла проводятся по прошествии времени $t_{ц}$ (здесь $t_{ц}$ – характерное время проведения цикла). Обозначим символом σ^{II}_{ij} новое напряжённое состояние массива горных пород, формирующееся вследствие создания в момент времени $t = t_0 + t_{ц}$ второй заходки с поверхностью обнажения S_2 ; символом $\Delta\sigma^2_{ij}$ – соответствующее изменение предыдущего напряжённого состояния массива σ^I_{ij} . Подобно соотношению (1), можно записать

$$\sigma^{II}_{ij} = \sigma^I_{ij} + \Delta\sigma^2_{ij} , \quad t_0 + t_{ц} \leq t < t_0 + 2t_{ц}\quad (6)$$

Напряжения $\Delta\sigma^2_{ij}$, которые также назовём “дополнительными”, можно определить, воспользовавшись той же расчётной схемой, что изложена выше. В соответствии с ней считаем, что образование второй заходки в массиве горных пород означает такое перераспределение напряжений, при котором на поверхности обнажения S_2 проекции силового вектора σ^{II}_{ij} равны нулю, т.е.

$$\sigma^{II}_{ij}n_j|_{S_2} = 0 , \quad t_0 + t_{ц} \leq t < t_0 + 2t_{ц}\quad (7)$$

В этом случае из соотношений (6) и (7) следует, что на поверхности S_2 имеют место

$$\Delta\sigma^2_{ij}n_j|_{S_2} = -\sigma^I_{ij}n_j|_{S_2} , \quad t_0 + t_{ц} \leq t < t_0 + 2t_{ц}\quad (8)$$

Аналогично зависимости (4) можно принять

$$\Delta\sigma^2_{ij}n_j|_{\infty} = 0 , \quad t_0 + t_{ц} \leq t < t_0 + 2t_{ц}\quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) являются граничными условиями и условием “на бесконечности” в задаче определения дополнительных

напряжений второго расчётного цикла. Особенность построения решения этой задачи состоит в том, что в рассмотрение включается область, занятая закладкой, которая, как правило, имеет иные по отношению к окружающему массиву горной породы деформационные свойства. Обозначим их условно $E_3(\sigma, t)$. В настоящем описании метода последовательных циклов для простоты изложения предположим прочный контакт закладки с окружающим массивом горных пород, т.е. будем считать, что смещения u_j и их производные в задаче (8), (9) непрерывны на поверхности контакта блоков закладки.

Пусть $\Delta\sigma^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t)$ и $\Delta\varepsilon^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t)$ – соответственно выражения для напряжений и деформаций, представляющие решение задачи второго расчётного цикла. Тогда искомое напряжённо-деформированное состояние массива горных пород после проведения очистных работ второго цикла в соответствии с выражениями (5) и (6) представляется следующими формулами:

$$\begin{aligned}\sigma^{II}_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t) &= \sigma^0_{ij} + \Delta\sigma^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t) + \Delta\sigma^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t); \\ \varepsilon^{II}_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t) &= \varepsilon^0_{ij} + \Delta\varepsilon^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t) + \Delta\varepsilon^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t); \\ t_0 + t_{ц} &\leq t < t_0 + 2t_{ц}\end{aligned}\quad (10)$$

а напряжённо-деформированное состояние блока закладки представляется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma^{II}_{ij}(1 \text{ закл}) &= \Delta\sigma^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t); \\ \varepsilon^{II}_{ij}(1 \text{ закл}) &= \Delta\varepsilon^2_{ij}(E(\sigma^I_{ij}), t); \\ t_0 + t_{ц} &\leq t < t_0 + 2t_{ц}\end{aligned}\quad (11)$$

Второй расчётный цикл можно считать завершённым, поскольку закладка второй заходки практически не изменяет напряжённо-деформированное состояние.

Рассуждая подобным образом и далее, можно заключить, что после осуществления N расчётных циклов напряжённо-деформированное состояние можно представить следующими формулами:

В массиве горных пород

$$\begin{aligned}\sigma^N_{ij}(E(\sigma^{N-1}_{ij}), t) &= \sigma^0_{ij} + \Delta\sigma^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t) + \dots + \Delta\sigma^N_{ij}(E(\sigma^{N-1}_{ij}), t) = \\ &= \sigma^0_{ij} + \sum_{n=1}^N \{ \Delta\sigma^n_{ij}(E(\sigma^{n-1}_{ij}), t) \}; \\ \varepsilon^N_{ij}(E(\sigma^{N-1}_{ij}), t) &= \varepsilon^0_{ij} + \Delta\varepsilon^1_{ij}(E(\sigma^0_{ij}), t) + \dots + \Delta\varepsilon^N_{ij}(E(\sigma^{N-1}_{ij}), t) = \\ &= \varepsilon^0_{ij} + \sum_{n=1}^N \{ \Delta\varepsilon^n_{ij}(E(\sigma^{n-1}_{ij}), t) \}; \\ t_0 + (N-1)t_{ц} &\leq t < t_0 + Nt_{ц}\end{aligned}\quad (12)$$

в K -ом блоке закладки

$$\begin{aligned}\sigma^N_{ij}(K \text{ закл}) &= \sum_{n=K+1}^N \{ \Delta\sigma^n_{ij} \}; \\ \varepsilon^N_{ij}(K \text{ закл}) &= \sum_{n=K+1}^N \{ \Delta\varepsilon^n_{ij} \}; \\ t_0 + (N-1)t_{ц} &\leq t < t_0 + Nt_{ц}\end{aligned}\quad (13)$$

Выражения (12) и (13) являются основными формулами расчёта напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и

закладки методом последовательных циклов. Характерная черта этих формул – последовательность расчётов. При этом в математическом отношении важно, что каждая этапная задача, отражающая образование новой заходки, имеет постановку в соответствующих дополнительных напряжениях.

Последовательный расчёт в дополнительных напряжениях позволяет более точно определять напряжённо-деформированное состояние массива горных пород и при отсутствии закладки выработанного пространства. Это относится, например, к случаю создания больших очистных выработок. В предположении идеальной упругости последовательность расширения выработанного пространства в расчёте напряжённо-деформированного состояния не играет роли, важна лишь его конечная конфигурация. Однако эта последовательность влияет на напряжённо-деформированное состояние, если массив горной породы проявляет нелинейные деформационные свойства (см., например, работу [103]). Вообще говоря, можно указать на определённую аналогию метода последовательных циклов и метода дополнительных нагрузок, предложенного для решения нелинейных упругопластических задач механики деформируемого твёрдого тела [104].

Последовательность расчётов отражает, как было отмечено выше, последовательность очистных и закладочных работ, а также технологические особенности формирования закладки. В этой связи метод последовательных циклов по сравнению с традиционным методом расчёта, который для определённости назовём методом расчёта "по конечному состоянию", прямым образом включает новую информацию технологического характера о контактных условиях на границах сопряжения блоков закладки и массива горных пород, о последовательности развития горных работ, о временных характеристиках движения фронта очистных работ и т.п.

Из формул (12) и (13) следует, что напряжённое состояние в массиве горных пород и в отдельных блоках закладки представляется разными формулами, вследствие чего на границе блоков могут иметь место скачки соответствующих компонент напряжений.

Последовательность расчётов напряжённо-деформированного состояния даёт возможность, допустив небольшую погрешность, существенно упростить учёт реологических свойств массива горных пород и закладки. В каждой задаче расчёта дополнительных напряжений можно считать, что деформационные свойства горной породы и закладки не зависят от времени, но значение их деформационных характеристик следует назначать исходя из соответствующего прошедшего периода времени.

В качестве численного метода решения этапных математических задач в методе последовательных циклов удобно использовать метод конечных элементов, при помощи которого можно рассчитывать напряжённо-деформированное состояние сложных неоднородных сред.

3. Расчёты напряжённого состояния массива горных пород с закладкой.

В данном разделе содержатся результаты расчётов методом последовательных циклов напряжённого состояния массива горных пород и закладки при отработке на большой глубине горизонтальной залежи полезного ископаемого (см. также работы [105-107]).

Пример 1. Для сравнения расчёта методом последовательных циклов с методом расчёта "по конечному состоянию" рассмотрим следующую задачу. Пусть необходимо найти поле напряжений в массиве горных пород и закладке при отработке слоя полезного ископаемого. Пусть условия отработки отвечают условиям плоской деформации в расчётной схеме, изображённой на рис. 1, сечение очистной выработки имеет прямоугольную форму с соотношением сторон 1:10. Пусть, кроме того, закладка имеет те же модули упругости, что и вмещающий массив горной породы.

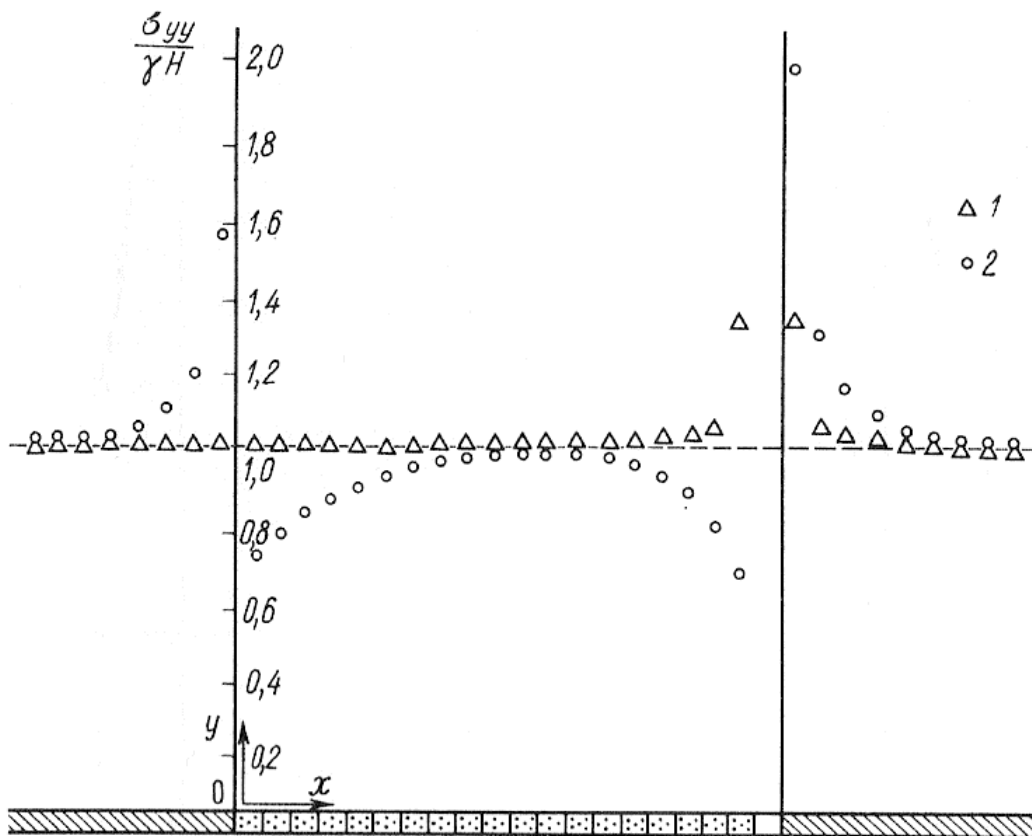


Рис. 2. Распределение усреднённых напряжений σ_{yy} в массиве горных пород и закладке

- 1 - расчёт "по конечному состоянию";
- 2 - расчёт методом последовательных циклов.

При расчёте поля напряжений "по конечному состоянию" задача обычно формулируется следующим образом. Найти напряжённое состояние упругой среды возле "отверстия" при действии на "бесконечности" заданной нагрузки. В соответствии с принятыми условиями в рассматриваемой задаче упругая среда является однородной, "отверстие" (заходка) имеет вид щели. Пусть,

например, исходное напряжённое состояние задаётся следующими выражениями $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \gamma H$. Эту задачу сравнительно легко решить, воспользовавшись методом, изложенным в работе [22].

Рис. 2 отражает некоторые результаты решения. Средние значения вертикальных в блоках закладки отмечены треугольниками, аналогично представлены средние вертикальные напряжения в массиве горных пород. Из рисунка можно заключить, что в целом напряжённое состояние массива горных пород и закладки совпадает с исходным напряжённым состоянием массива горных пород (пунктирная линия). Перераспределение напряжений происходит лишь в небольшой области массива вблизи заходки. Среднее вертикальное напряжение в стенке очистного забоя приблизительно равно $1,35\gamma H$. Если, например, в задаче рассмотреть случай полной закладки выработанного пространства, то, даже не прибегая к расчётам, легко можно заключить, что напряжённое состояние массива горной породы и закладки должно быть однородным и полностью совпадать с исходным напряжённым состоянием. Следовательно, расчёты "по конечному состоянию" в этом случае не могут выявить перераспределение напряжений в массиве горных пород.

В расчётах напряжённого состояния методом последовательных циклов выявляются иные закономерности в распределении напряжений. Средние вертикальные напряжения в блоках закладки, вычисленные при помощи этого метода, отмечены на рис. 2 кружками (аналогично представлены средние вертикальные напряжения в массиве горных пород). По рисунку можно проследить нарастание давления на весь массив закладки. Более интенсивный рост давления происходит со стороны фронта очистных работ. Средние вертикальные напряжения в массиве горных пород приблизительно равны: в стенке очистного забоя $2\gamma H$, вблизи первых сформированных блоков закладки $1,6\gamma H$. В целом область перераспределений напряжений в массиве горных пород значительно шире. Характерный линейный размер этой области при неустановившемся режиме перераспределения напряжений определяется размером всей подработки. В рассмотренной ранее задаче характерным размером области перераспределений напряжений является линейный размер заходки.

Следует отметить, что при предположении упругости закладки распределение напряжений в пределах каждого её блока, определённое при помощи метода последовательных циклов, имеет неоднородный характер. Примеры 2 и 3 иллюстрируют это.

Пример 2. Рассмотрим пример расчёта методом последовательных циклов напряжённого состояния массива горных пород и закладки при отработке слоя полезного ископаемого в случае, когда модули упругости горной породы E и закладки E_3 находятся в отношении $E=10E_3$. На рис. 3 представлено полученное в условиях плоской деформации распределения вертикальных напряжений σ_{yy} вдоль оси симметрии x после шести циклов выемка-закладка. Из рисунка следует, что поле напряжений в закладке имеет существенно неоднородный характер. На границе блоков закладки имеют место скачки напряжений. Как уже было отмечено, скачки напряжений на границе блоков предопределяются расчётными формулами (9)–(11).

Величины скачков напряжений зависят от соотношения модулей деформации горной породы и закладки (см. пример 3), а также в меньшей степени – от условий на границе блоков закладки друг с другом, с кровлей и с почвой. В рассмотренных примерах предположен прочный контакт на границе блоков.

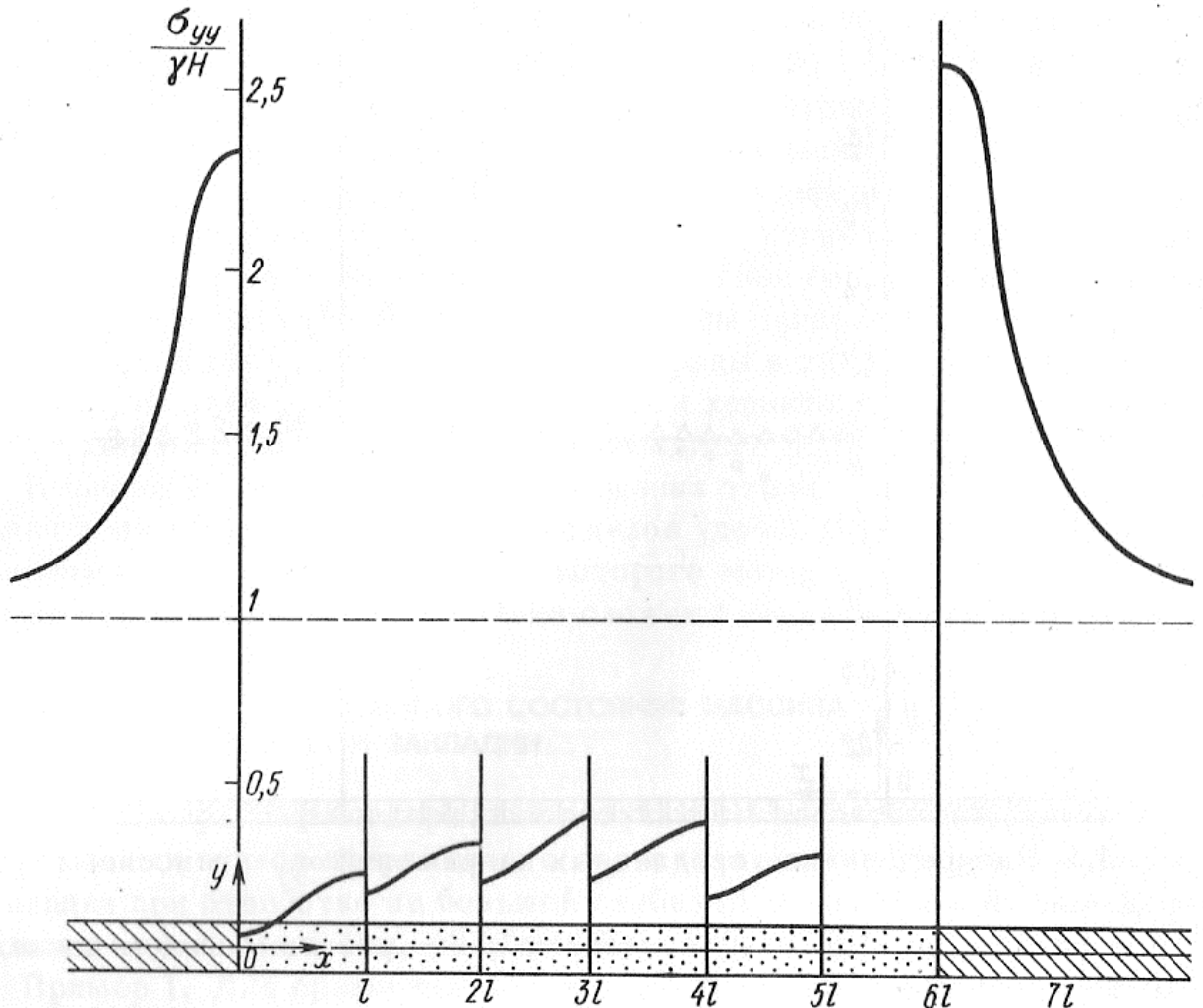


Рис. 3. Распределение напряжений σ_{yy} в массиве горных пород и закладке после шести циклов выемка-закладка, $E = 10E_3$.

При уменьшении ширины блоков закладки, как показали дополнительные расчёты, распределение напряжений в закладке принимает более однородный характер. Распределение напряжений в закладке и в массиве горных пород зависит от направления развития очистных работ: в последних несущих блоках закладки напряжения σ_{yy} в целом несколько выше, чем в блоках, сформированных в самом начале закладочных работ. Концентрации вертикальных напряжений в массиве горных пород вблизи передового очистного забоя несколько выше, чем вблизи первых сформированных блоков закладки.

Отмеченные закономерности в распределении напряжений обусловлены циклическим характером очистных и закладочных работ, и, естественно, они не могут быть выявлены методом расчёта "по конечному состоянию".

Пример 3. Передача горного давления со стороны вмещающего массива горных пород на закладку определяется многими факторами. Анализ результатов расчётов напряжений в массиве горных пород и закладке показывает, что главным фактором влияния является соотношение модулей упругости (в общем случае модулей деформации) массива горных пород и закладки.

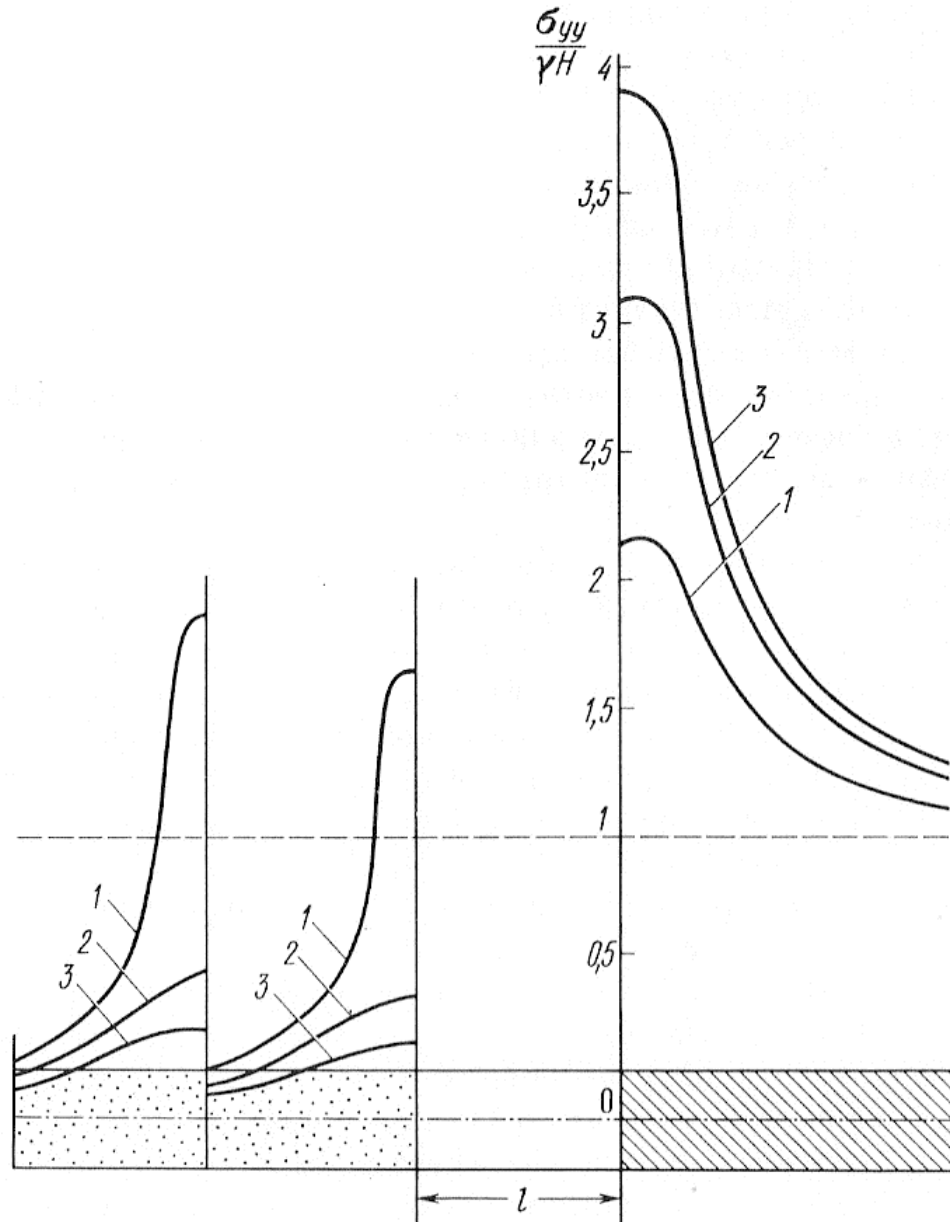


Рис. 4. Распределение напряжений σ_{yy} в массиве горных пород и блоках закладки
 1 - $E = E_3$
 2 - $E = 10E_3$
 3 - $E = 20E_3$

На рис. 4 изображены кривые распределения вертикальных напряжений в средней части блоков закладки, расположенных вблизи очистного пространства, при следующих величинах отношения модулей упругости закладки и горной породы E_3/E : 1; 0,1; 0,05. Отношение пролёта заходки к высоте равно двум. Из рисунка видно, что при повышении жёсткости закладки она скорее и в большей степени воспринимает давление подрабатываемых толщ, тем самым,

разгружая призабойную зону массива горных пород. Например, при повышении отношения E_3/E с 0,05 до 1 среднее давление на первый несущий блок закладки увеличивается приблизительно в 4 раза, а условный коэффициент концентрации напряжений σ_{vv} в массиве горных пород уменьшается в 1,8 раза. Распределение напряжений в массиве горных пород по направлению развития фронта очистных работ имеет обычный характер монотонного изменения (см., например, рис. 2).

Вместе с тем при повышении жёсткости закладки возрастает неравномерность распределения напряжений в блоках закладки. Если деформационный модуль закладки достигает 10 и более процентов от модуля деформации горной породы, то давление налегающей толщи может изменяться по ширине блока закладки более чем в 2 раза. При этом резкая неоднородность поля напряжений будет свойственна и налегающей, и подстилающей части массива горных пород. Высокие напряжения в краевых частях закладки могут вызвать её разрушение на вертикальных обнажениях. Следовательно, применение крайне жёсткой закладки (при этом модули деформирования горной породы и закладки различаются менее чем в 5 раз) при отработке месторождений на больших глубинах нецелесообразно. Оптимальные условия отработки месторождения на больших глубинах, при которых слой закладки не разрушается под давлением вышележащей толщи и в то же время эффективно воспринимает нагрузку, достигается тогда, когда модуль деформации горной породы и эффективный модуль деформации полностью затвердевшей закладки различаются примерно в 10-20 раз.

Пример 4. В предыдущем примере отмечалось, что наряду с деформационными свойствами массива горных пород важную роль в перераспределении напряжений между массивом горных пород и закладкой играют деформационные свойства закладки. Деформационные свойства закладки очень сложны. Например, для твердеющей закладки они, во-первых, изменяются во времени при твердении закладки. Модуль деформации и прочность кубика при одних и тех же условиях нагружения могут увеличиться более чем в 10 раз. Во-вторых, закладка обладает способностью под давлением уплотняться. Величина предельного уплотнения закладки за счёт уменьшения пористости обычно составляет для твердеющей закладки несколько процентов. В-третьих, при возрастании нагрузки деформирование плотно упакованной закладки приобретает явно выраженный пластический характер [108]. В-четвёртых, на деформационные свойства массива закладки на начальной стадии её деформирования влияет и площадь контакта закладки с кровлей. Обычно вследствие неровности кровли выработки образуются отдельные пустоты, т.е. имеет место неполная закладка выработок [83]. Это, естественно, затрудняет перераспределение напряжений между массивом горной породы и закладкой.

Таким образом, при деформировании закладки можно выделить три характерные этапа. Начальный – с низким модулем деформации, на котором в основном проявляется твердение закладки, её усадка под давлением, а также затекание отдельных пустот; этап упрочнения закладки и конечный этап пластического деформирования, сопровождающийся понижением модуля деформации при её дальнейшем нагружении.

В качестве примера учёта влияния нелинейных деформационных свойств закладки на характер распределения в ней напряжений, рассмотрим отработку слоя полезного ископаемого, считая, что закладка характеризуется двумя из указанных выше этапов деформирования: начальным – с низким модулем деформации и этапом упрочнения.

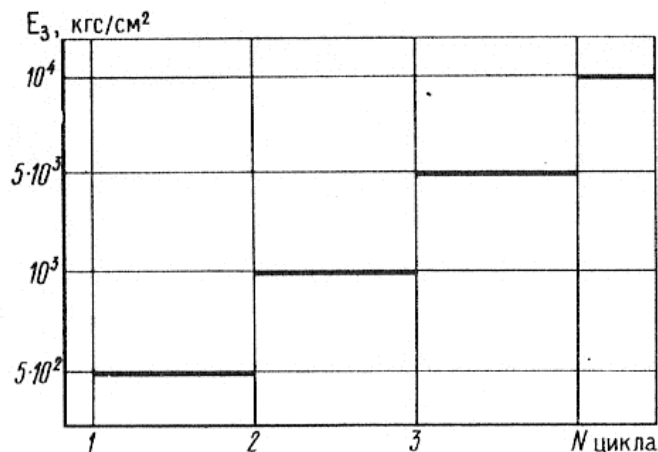


Рис. 5. Схема изменения E_3 от цикла к циклу

В расчётах приняты следующие исходные величины: модуль упругости горной породы $E = 10^5$ кгс/см², коэффициент Пуассона 0,3. Изменение модуля закладки от цикла к циклу показано на рис. 5. Если задано характерное время цикла $t_{ц}$, то представленная схема может условно отображать изменение модуля деформации закладки при её твердении. Исходное напряжённое состояние массива горной породы принято гидростатическим.

В этом примере рассматривается случай симметрично расходящихся фронтов очистных работ. Вследствие особенностей сетки разбиения в методе конечных элементов блоки закладки имеют разную ширину. Размеры наименьшей заходки: пролёт – 6м, высота – 3м.

По результатам расчёта построены эпюры нарастания давления на закладку в зависимости от продвижения фронтов очистных работ в слое (рис. 6). Качественное сопоставление результатов этого примера с результатами расчётов напряжений в закладке без учёта её нелинейных свойств (примеры 2 и 3) показывает, что учёт нелинейных свойств приводит к иной картине распределения напряжений. Блоки закладки, прилегающие к очистному пространству, в этом случае образуют зону малой нагрузки. Значительное давление могут воспринимать те блоки закладки, которые "прошли" начальный этап деформирования. Для этой части массива закладки проявляются те закономерности в распределении напряжений, которые установлены по "чисто" упругой модели. Увеличение величины усадки и времени твердения закладки ведёт к расширению зоны перераспределений напряжений возле очистной выработки; при этом, очевидно, возрастает коэффициент концентрации напряжений в массиве горных пород.

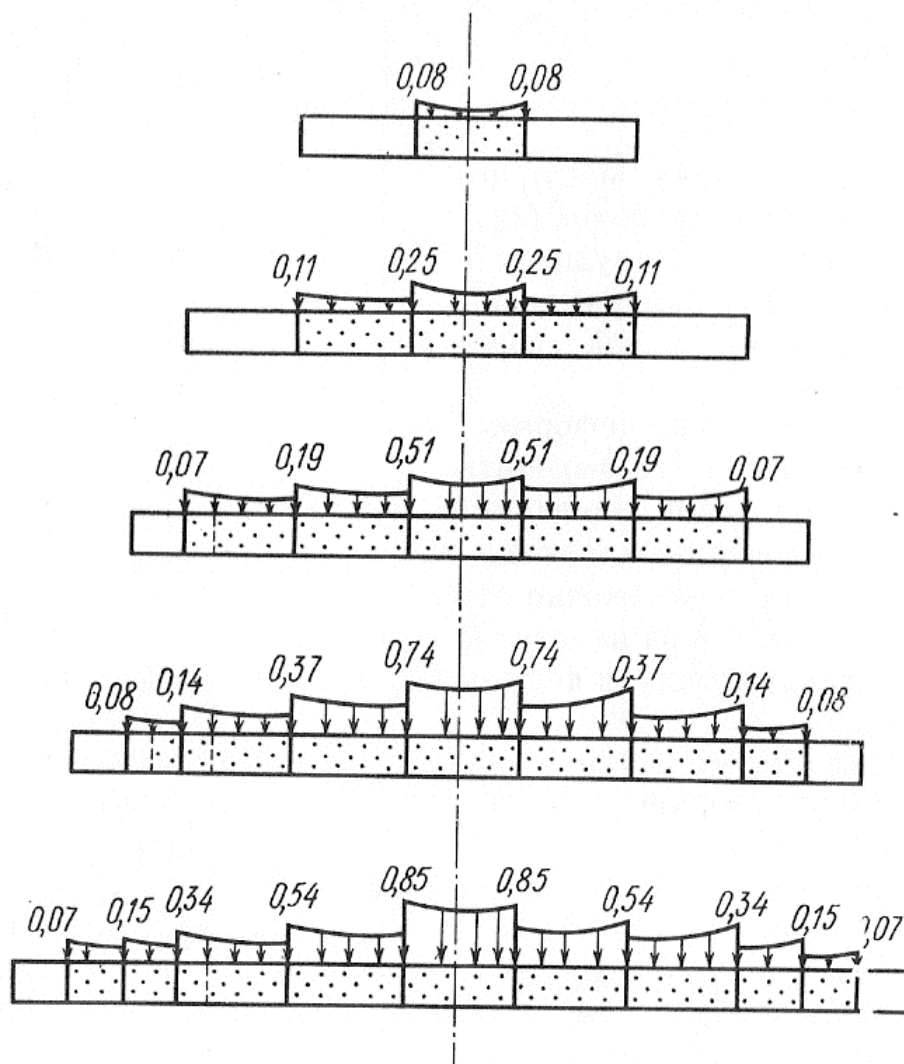


Рис. 6. Распределение вертикальных напряжений $\sigma_{yy}/\gamma H$ в закладке с учётом её нелинейных деформационных свойств.

Пример 5. Рассмотрим в этом примере условия разрушения массива твердеющей закладки. Под давлением налегающих толщ возможно разрушение закладки и в глубине массива и на обнажениях, если закладка по своим деформационным свойствам близка к упругому телу, причём модуль упругости близок к модулю упругости горной породы. Этот вывод следует, например, из примера 3. На практике закладку с такими свойствами не создают. Обычно создаваемая твердеющая закладка имеет нелинейный характер деформирования и в целом низкий модуль деформации, что позволяет её уподобить пластическому телу. Вследствие текучести такая закладка, даже воспринимая большие нагрузки, вряд ли может разрушаться на вертикальных обнажениях.

Разрушение твердеющей закладки, проявляющей свойства идеально пластического тела, может происходить (и происходит в ряде случаев на практике) на горизонтальных обнажениях закладки, например при её подработке при нисходящей слоевой системе разработки месторождения. В этой связи рассмотрим пример расчёта методом последовательных циклов напряжённого состояния закладки при её подработке. Исходные величины для расчётов заимствованы из предыдущего примера.

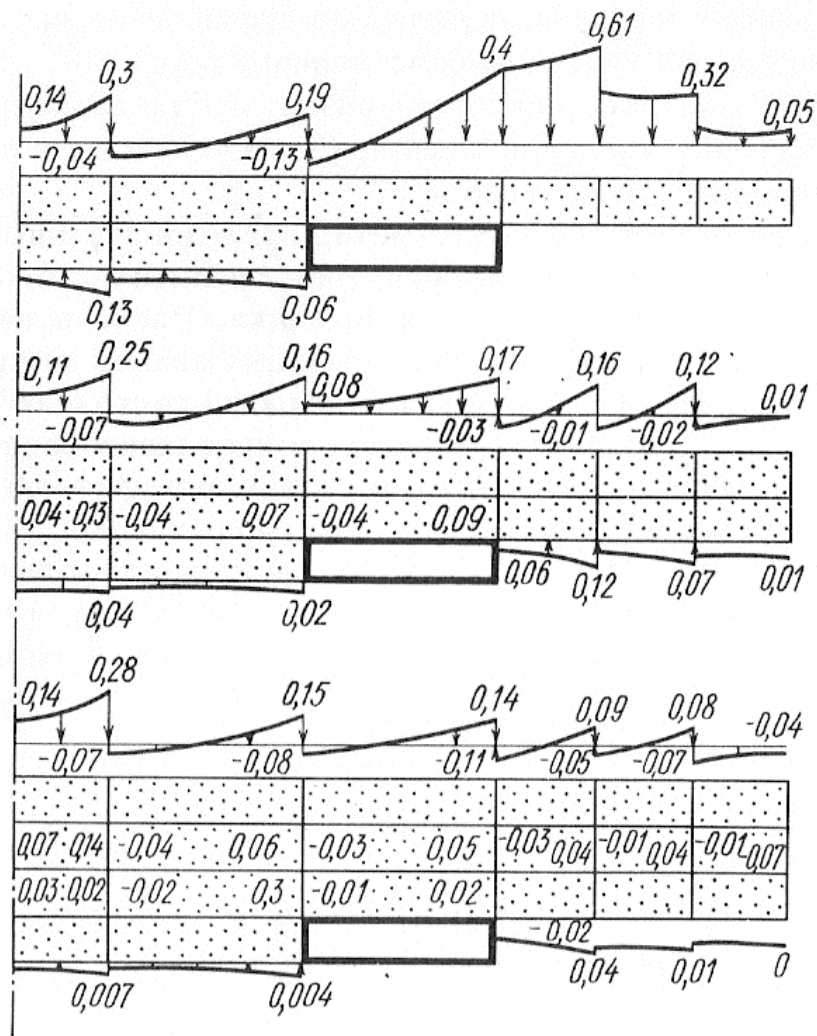


Рис. 7. Распределение вертикальных напряжений $\sigma_{yy}/\gamma H$ в блоках закладки при её подработке

На рис. 7 представлены эпюры распределения (или отдельные значения) вертикальных напряжений σ_{yy} в блоках закладки при её подработке для случаев отработки двух, трёх и четырёх слоёв.

Из рисунка следует, что при разной мощности налегающей закладки при её подработке в ней происходит разгрузка и даже появляются растягивающие напряжения. Появление растягивающих напряжений в рассмотренном примере обусловлено предположением упругости закладки в каждом расчётном цикле. Интерпретируя этот результат для закладки, проявляющей свойства пластического тела, можно предположить, что в части закладки, непосредственно находящейся в кровле очистной выработки, происходит полная разгрузка от действующих напряжений (за исключением напряжений, вызываемых весом самой закладки).

Следовательно, находящаяся в кровле твердеющая закладка, которая не имеет достаточной прочности на растяжение, может разрушаться под действием собственного веса (о возможном механизме разрушения подработанной закладки см. также работу [84]). На практике это наблюдается, например, в виде расслоения и обрушения закладки по слоям заливки цементной смеси в том случае, если эти слои вследствие нарушения технологии заливки имеют непрочный контакт. Таким образом, необходимым условием

устойчивости горизонтальных обнажений подработанной закладки является её способность противодействовать разрушению под влиянием собственного веса.

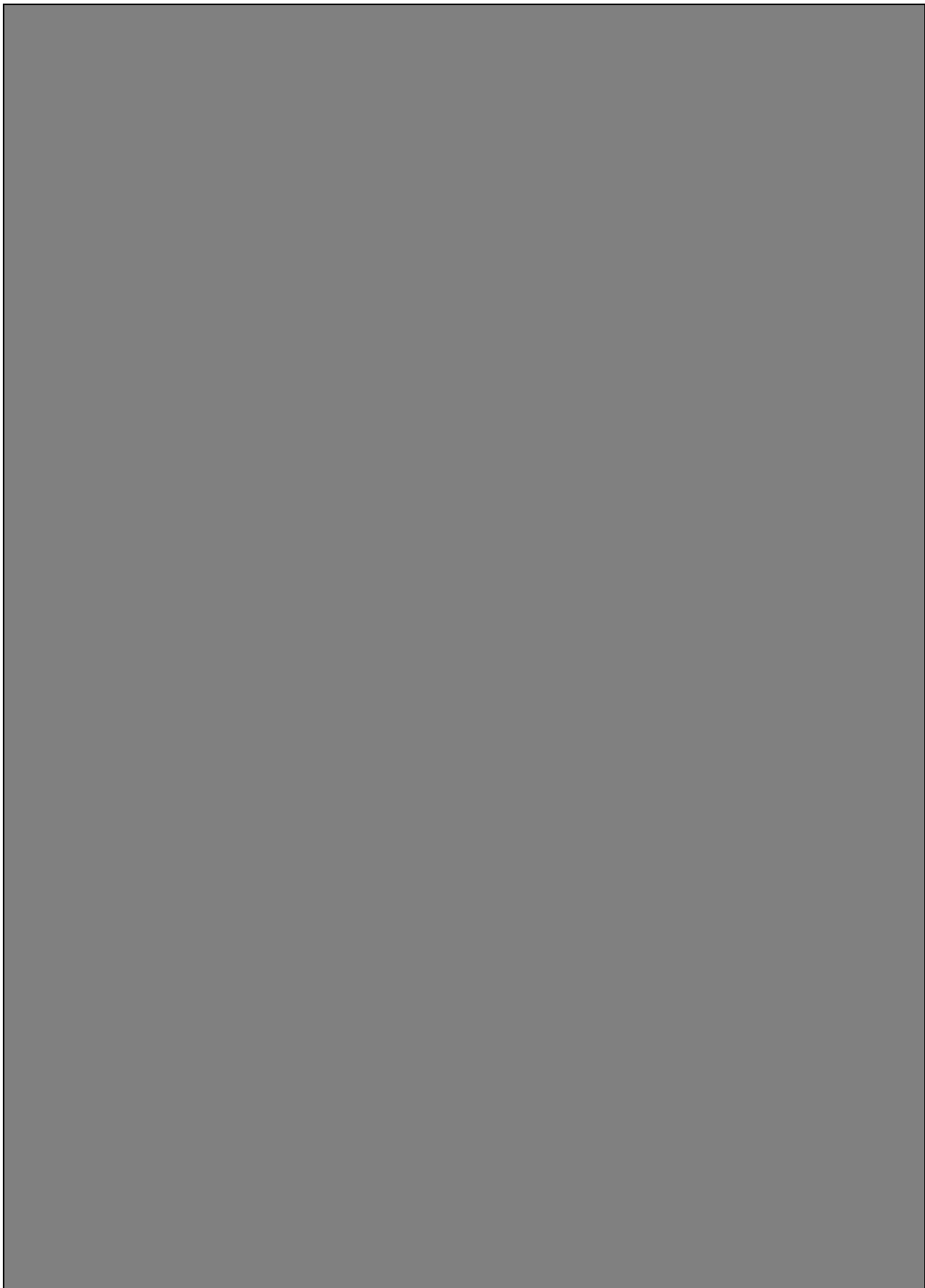
Заметим, что аналитический факт разгрузки закладки при её подработке может быть установлен лишь при использовании в исследованиях метода последовательных циклов.

В заключение подчеркнём, что метод последовательных циклов является новым и перспективным средством аналитического изучения напряжений в массиве горных пород и закладки. Расчёты перераспределения напряжений методом последовательных циклов по сравнению с традиционным методом расчёта "по конечному состоянию" дают возможность в более полной мере получить и проанализировать картину распределения напряжений в закладке, а также в прилегающих (налегающих и подстилающих) частях массива горных пород. Вместе с тем необходимо отметить, что, поскольку напряжённо-деформированное состояние находится по совокупности расчётов, метод последовательных циклов является довольно трудоёмким и предназначен главным образом для расчётов на достаточно мощных ЭВМ.

Литература :

- [22] Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966г., 707с.
- [82] Байконуров О.А. Подземная разработка месторождений с закладкой. Крупник Л.А. Алма-Ата: Наука, 1972г. 384с.
Мельников В.А.
- [83] Кравченко В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1974г., 200с.
Куликов В.В.
- [84] Цыгалов М.Н. Разработка месторождений полезных ископаемых с монолитной закладкой. М.: Недра, 1970г., 176с.
Зурков П.Э.
- [85] Бронников Д.М. Основы технологии подземной разработки рудных месторождений с закладкой. М.: Наука, 1973г., 200с.
Замесов Н.Ф.
Кириченко Г.С.
Богданов Г.И.
- [86] Мартемьянов Е.А. Исследование напряжённого состояния массива слабых руд и твердеющей закладки с целью выбора параметров системы разработки с нисходящей слоевой выемкой: Автореф.дис. канд.тех.наук. М.: Моск.Горн.Ин-т, 1974г.
- [87] Курленя М.В. Об экспериментально-аналитической оценке Никифоровский В.С. технологических схем разработки в условиях Серяков В.М. Норильских рудников. – Физ.-техн.пробл.разраб.полез.ископаемых, 1979г, №3, с.17-23.
- [88] Либерман Ю.М. Давление на закладочный массив в зависимости от его компрессионных свойств. – В кн.: Науч.сообщ. Хаимова-Р.И. Малькова Р.И. Ин-та горн.дела им А.А.Скочинского. М.: Недра, 1972г., вып.103, с.18-22
- [89] Либерман Ю.М. Влияние некоторых горно-геологических параметров на напряжённо-деформированное состояние Малькова Р.И. закладочного массива. – В кн.: Науч.сообщ. Ин-та горн.дела им А.А.Скочинского. М.: Ин-та горн.дела им А.А.Скочинского, 1973г., вып.108, с.57-60
- [90] Либерман Ю.М. Давление горных пород на закладочный массив с нелинейной характеристикой усадки. – Хаимова-Р.И. Малькова Р.И. Физ.-техн.пробл.разраб.полез.ископаемых, 1978г, №2, с.3-7.
- [91] Либерман Ю.М. Влияние характера уплотнения закладочных Хаимова-Р.И. Малькова Р.И. материалов на конвергенцию пород кровли-почвы разрабатываемого угольного пласта. – Физ.-техн.пробл.разраб.полез.ископаемых, 1978г, №3, с.99-101.
- [92] Хаимова-Р.И. Малькова Р.И. Исследование напряжённо-деформированного состояния пород при разработке угольных пластов с закладкой выработанного пространства. – В кн.: Прикладные задачи механики горных пород. М.: Наука, 1977г., с.127-131.
- [93] Немировский Ю.В. Напряжённое состояние массива горной породы с Миренков В.Е. горизонтальной выработкой при наличии закладки. – Физ.-техн.пробл.разраб.полез.ископаемых, 1973г, №3, с.3-11.
- [94] Гоголин В.А. Исследование взаимодействия боковых пород с Рыжков Ю.А. закладочным массивом и угольным пластом. – В кн.: Подземная разработка мощных угольных пластов. Кемерово: Кузбас.политехн.ин-т, 1976г., вып.3, с.103-111.
- [95] Рыжков Ю.А. О влиянии несущей способности закладочного массива Волков А.Н. на его усадку и распределение опорного давления. – В кн.: Подземная разработка мощных угольных Гоголин В.А. Орлов В.Н. пластов. Кемерово: Кузбас.политехн.ин-т, 1976г.,

- вып.3, с.93-102.
- [96] Бейсетаев Р.Б. Исследование инженерного состояния массива горных пород при сплошной слоевой системе разработки рудных тел. - Физ.-техн.пробл. разраб.полез.ископаемых, 1977г, №5, с.36-47.
- [97] Петухов И.М. Предотвращение горных ударов на глубоких рудниках
Егоров П.В. Талнаха опережающей выемкой защитного слоя. -
Работа Э.Н. Физ.-техн.пробл. разраб.полез.ископаемых, 1979г,
№3, с.3-16.
- [98] Христианович С.А. О напряжённом состоянии горного массива при
Кузнецов С.В. проведении очистных работ. - В кн.: Горное
давление. Л.: Всесоюз.н.-и.ин-т горн. геомеханики
и маркшейд.дела., 1965г., вып.59, с.95-111.
- [99] Pariseau W.G. Support potential of hydraulic backfill: New
Kealy C.D. horizons in rock mechanics. N.Y.: Amer. Soc. Civ.
Eng., 1973y., pages 501-526.
- [100] Hill J. R.M. Support performance of hydraulic backfill: Report
McDonald M.M. of investigation N 7850. (USA): Bur. Mines.
McNay L.M. Washington, 1974y., 12 pages.
- [101] Pariseau W.G. A support-performance prediction method for
Hill J. R.M. hydraulic backfill: Report of investigation N
McDonald M.M. 8161. (USA): Bur. Washington, 1977y., pages 19.
McNay L.M.
- [102] Pariseau W.G. Estimation of support load requirements for
underground mine openings by computer simulation
of mining sequence. - Trans. Soc. Mining Eng.AIME,
1977y., vol.262, N 2 (June), pages 100-109.
- [103] Kulhawy F. Finite element modeling criteria for underground
openings in rock. - Intern. J. Rock Mech. and
Mining Sci. and Mining Geomech. Abstrs, 1974y.,
vol.11, pages 465-472.
- [104] Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948г., 376с.
- [105] Кузнецов С.В. О распределении напряжений в рудном, породном и
Одинцев В.Н. закладочном массивах при начальной стадии
отработки Яковлевского месторождения КМА. - В кн.:
Механика горных пород и проявления горного
давления. М.: Сектор физ.-техн.горн.пробл. Ин-та
физики Земли АН СССР, 1977г., с.5-12.
- [106] Кузнецов С.В. Метод последовательных циклов расчёта напряжённо-
Одинцев В.Н. деформированного состояния массива горной породы и
закладки выработанного пространства. - В кн.:
Вопросы механики горных пород при разработке
месторождений твёрдых полезных ископаемых. М.: Ин-
т пробл.комплекс.освоения недр АН СССР, 1979г.,
с.97-109.
- [107] Ветров С.В. Сопоставление технологических схем разработки
Одинцев В.Н. Яковлевского месторождения по фактору напряжённо-
Слоним М.Э. деформированного состояния массива горных пород и
закладки. - В кн.: Вопросы механики горных пород
при разработке месторождений твёрдых полезных
ископаемых. М.: Ин-т пробл.комплекс.освоения недр
АН СССР, 1979г., с.110-124.
- [108] Аксенов В.К. Применение дилатометрической аппаратуры для оценки
Федоренко В.К. свойств закладочного и рудного массивов. - В кн.:
Липчанский Б.М. Напряжённое состояние породных массивов.
Новосибирск.: Ин-т горн.дела СО АН СССР, 1978г.,
с.32-37



МГГРУ © 2005 год