

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Горные машины»

## ГОРНОЕ ДЕЛО

Практикум  
для студентов специальности  
1-36 10 01 «Горные машины и оборудование  
(по направлениям)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области горнодобывающей промышленности*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 622.002.5.001.63  
ББК 33.16я7  
Г69

С о с т а в и т е л и:

*Н. И. Березовский, Е. К. Костюкевич*

Р е ц е н з е н т ы:

*А. Н. Орда, Д. Б. Джелилов*

**Горное дело:** практикум для студентов специальности 1-36 10 01  
Г69 «Горные машины и оборудование (по направлениям)» / сост.:  
Н. И. Березовский, Е. К. Костюкевич. – Минск : БНТУ, 2019. – 39 с.  
ISBN 978-985-550-882-4.

Представлены краткие теоретические сведения о вариантах управления горным давлением при освоении рудных месторождений; приведены методики решения задач по определению оптимальных параметров элементов системы разработки.

Практикум предназначен для студентов специальности 1-36 10 01 «Горные машины и оборудование (по направлениям)».

УДК 622.002.5.001.63  
ББК 33.16я7

ISBN 978-985-550-882-4

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## Предисловие

Студент должен изучать учебный материал последовательно, раздел за разделом. В случае затруднений или при углубленном изучении материала следует обратиться к источникам информации, рекомендуемым преподавателем.

Построение отчета рекомендуется делать в соответствии со следующей структурой:

- 1) титульный лист;
- 2) введение, в котором кратко дается состояние проблемы, выявляется необходимость и цель проведения работы;
- 3) краткий анализ возможных подходов к решению поставленной задачи, выбор путей и средств достижения целей.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Цель работы:** изучение вариантов управления горным давлением при разработке рудных месторождений, освоение методики расчета оптимальных параметров элементов системы разработки рудных месторождений.

## Общие положения

Под действием сил веса вышележащей толщи горные породы находятся в напряженном состоянии, степень которого зависит от глубины разработки.

*Горным давлением* называют силы в породах, окружающей горную выработку. Основной причиной горного давления являются силы тяжести, вследствие которых породный массив находится в напряженном состоянии.

Горные породы внутри земной коры находятся в состоянии напряженного равновесия, вызываемого действием сил гравитационного и тектонического характера. Из-за отсутствия свободных пространств внутри массива без влияния внешних сил породы не могут перемещаться, изгибаться или изменять свою форму.

Напряженное состояние вызывается собственным весом вышележащих пород (гравитационными силами), тектоническими силами, а также температурными градиентами.

Напряженное состояние нетронутого массива, созданного гравитационными силами, считается известным, если в каждой точке массива определены главные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  (рис. 1).

Напряжения, действующие в горизонтальном направлении  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , определяются упругими деформационными свойствами пород на рассматриваемой глубине:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma \cdot H, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  
 $\gamma$  – объемный вес пород;  
 $H$  – глубина разработки.

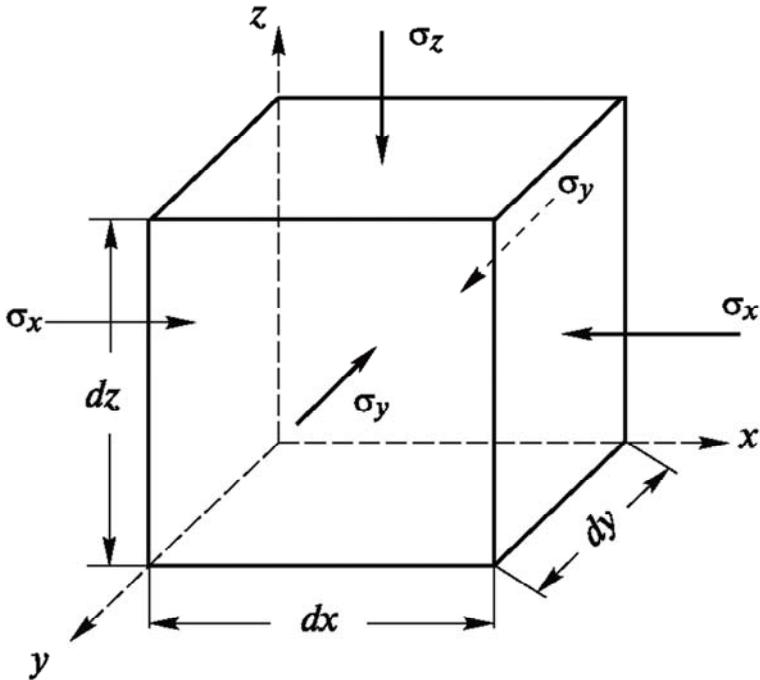


Рис. 1. Элементарный кубик в поле гравитационных напряжений

Напряжение  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  всегда ортогональны (взаимно перпендикулярны) к напряжениям  $\sigma_z$ .

При проведении горных выработок в толще пород вокруг них происходит перераспределение напряжений, в процессе которого породы стремятся перейти в новое состояние равновесия и претерпевают те или иные деформации.

Характер и величина горного давления зависят от физико-механических свойств горных пород, глубины заложения выработки от поверхности, формы и размеров ее поперечного сечения, положения выработки в пространстве и других факторов.

Наиболее характерными проявлениями горного давления считаются трещины различной частоты и размеров, отслоения, вывалы, обрушения, завалы, горные удары различной степени силы.

Под *управлением горным давлением* понимают проведение специальных мероприятий с целью уменьшения или разрядки напряженного состояния отдельных участков рудного массива и вмещающих пород для безопасного и нормального продолжения очистной выемки.

Выделяют следующие способы управления горным давлением:

поддержание выработанного пространства и предохранение пород кровли от обрушения;

обрушение пород кровли, обрушение руды и вмещающих пород.

Поддержание выработанного пространства целиками руды применяется только при месторождениях с устойчивой, преимущественно крепкой рудой и такими же боковыми породами.

**Целик** – часть залежи или пласта полезного ископаемого, оставляемая нетронутой при разработке месторождения для охраны горных выработок, наземных сооружений, управления горным давлением и для других целей.

При камерных системах разработки (этажно-камерная, камерно-столбовая и др.) в процессе проведения очистных работ формируются рудные целики различного назначения: междукамерные, межпанельные, потолочные и пр. Их общее назначение - создание подземной пространственной конструкции, обеспечивающей сохранение системы очистных пространств. Целики представляют собой несущие элементы указанной про-

странственной конструкции и, следовательно, должны отвечать определенным прочностным требованиям.

В зависимости от назначения и расположения целики, оставляемые при разработке рудных месторождений, могут быть:

охранные – для охраны основных горных выработок, подземных и вентиляционных шахт, уклонов и т. п., а также различных поверхностных сооружений и водоемов;

междуэтажные – с целью сохранения выработок вышележащего этажа или в связи с образованием камер, потолочина которых отрабатывается во вторую очередь;

междукамерные – между смежными камерами;

междублоковые – между смежными блоками в том случае, когда блок включает несколько камер и междукамерных целиков;

барьерные – между отдельными участками шахтного поля, обрабатываемыми самостоятельно;

подкровельные – у недостаточно устойчивого висячего бока месторождения;

опорные – при пологом и наклонном падении залежи в очистном пространстве.

Число и размеры целиков определяются:

крепостью и устойчивостью пород кровли;

прочностью руды;

характеристикой пород лежащего бока;

глубиной разработки и зависящей от нее величиной давления; мощностью рудной залежи.

Основное назначение целиков при системах разработки короткими столбами, камерных и камерно-столбовых системах разработки – управление кровлей.

По *конфигурации* горизонтальных сечений различают целики ленточные и столбчатые (рис. 2).

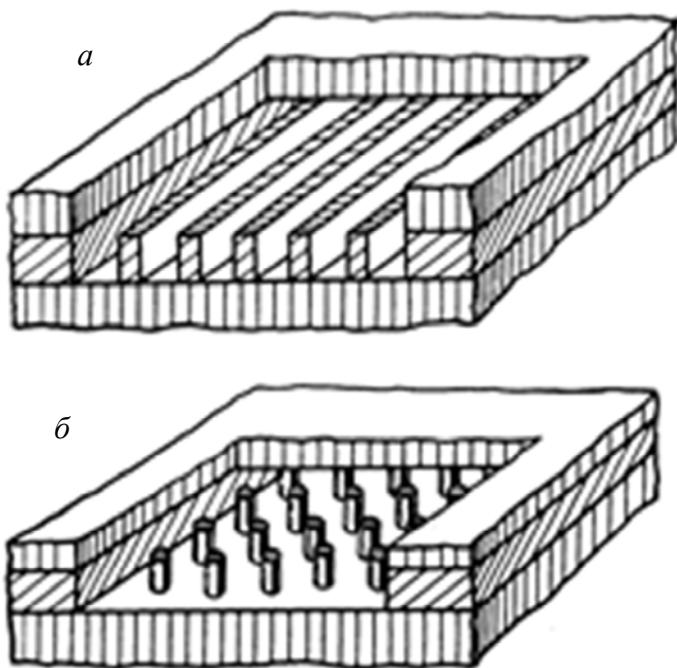


Рис. 2. Схемы поддержания очистных пространств:  
*а* – с помощью ленточных; *б* – столбчатых целиков

Преимущества управления горным давлением путем оставления целиков:

- простота метода, поскольку оставление целиков в процессе очистной выемки не вызывает затруднений;

- снижение до минимума затрат на искусственное крепление;
- устранение опасности пожара;

- сохранение поверхности;

- дополнительное извлечение руды из целиков при отсутствии необходимости в сохранении поверхности.

К недостаткам управления горным давлением путем оставления целиков следует отнести:

- большие потери руды, особенно при необходимости сохранения поверхности;

нецелесообразность применения при богатых рудах, так как во многих случаях выгоднее извлечь богатую руду, применив другие, менее экономичные системы разработки;

отсутствие возможности обеспечить регулярное расположение целиков, что необходимо для обеспечения прочного поддержания кровли.

**Системой разработки рудного месторождения** или его части называется порядок и технология очистной выемки руды определенной совокупностью конструктивных элементов выемочного участка.

Руда, оставляемая в целиках, или теряется безвозвратно, или отрабатывается со значительно более низкими показателями.

Соотношение запасов в камерах и целиках также определяется размерами несущих элементов: минимально допустимыми размерами целиков и предельно допустимыми размерами породных и рудных обнажений.

Под **устойчивостью целиков**, выработок и обнажений понимается такое их состояние, при котором не происходит сколько-нибудь значительного их разрушения в течение необходимого промежутка времени, определяемого технологией горных работ, конструкцией системы разработки.

Устойчивость зависит от целого ряда факторов, которые условно разделяются на три группы: геомеханические, горно-геологические, технологические.

К **геомеханическим факторам** относятся прочностные и деформационные свойства массива, его структурное строение, величина и характер действующих напряжений в нетронутом массиве.

К **горно-геологическим факторам** относятся мощность и угол падения рудной залежи, размеры по простиранию и вкрест простирания.

К **технологическим факторам** относят глубину горных работ, форму и размеры несущих конструктивных элементов системы разработки, способ управления горным давлением.

Размер и форма целиков, а также параметры крепления камеры должны рассчитываться в соответствии с принятыми нормами и правилами на устойчивость и исключать обрушение пород в рабочей зоне. При отсутствии расчетных методик, учитывающих специфику горнотехнических условий отрабатываемых пластов, параметры системы разработки должны уточняться опытным путем.

На Старобинском месторождении калийных солей применяются следующие системы разработки:

- камерная;
- столбовая;
- комбинированная.

Основополагающим подходом при выборе систем разработки соляных месторождений является недопустимость проникновения воды в подземное пространство рудников.

Для отработки калийных пластов Старобинского месторождения применяются два варианта камерной системы (рис. 3):

- с оставлением жестких целиков;
- с оставлением податливых целиков.

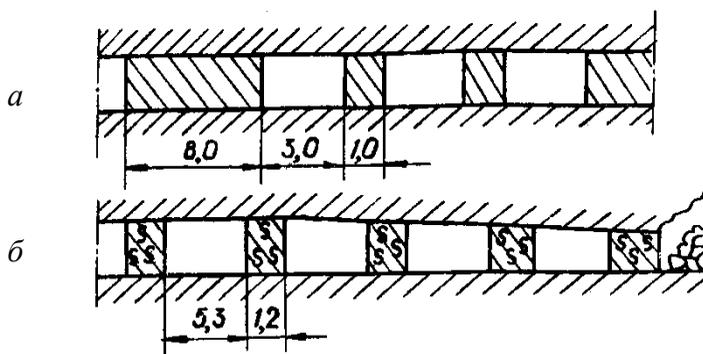


Рис. 3. Варианты камерной разработки:  
*a* – с жесткими; *б* – податливыми целиками

Параметры камерной системы разработки определяются расчетным путем либо принимаются на основании опытных данных.

К параметрам камерной системы разработки относятся:  
размеры очистных камер (пролет, высота, длина);  
размеры междукамерных и поддерживающих целиков;  
размеры камер разворота комбайнов;  
длина и ширина панелей, блоков;  
расстояние между фронтами очистных работ в смежных блоках.

Параметры камерной системы разработки должны обеспечивать:

защиту рудника от прорыва подземных вод;

безопасное состояние горных выработок в течение ответственного им срока службы;

максимально-возможное извлечение полезного ископаемого из недр.

Камерная система разработки с оставлением жестких целиков предусматривает оставление в выработанном пространстве целиков высокой несущей способности, в результате чего они не разрушаются горным давлением в зоне ведения очистных работ.

Характерная технологическая схема камерной системы разработки на Старобинском месторождении калийных солей приведена на рис. 4. Панели отрабатываются преимущественно односторонними блоками шириной 150–200 м с расположением очистных камер параллельно панельным штрекам.

Данная технологическая схема предусматривает отработку калийных пластов с применением для очистных работ комбайнов типа Урал-10, ПК-8, ПК-8МА, ПКС-8, Урал-61, КРП-3-660/1140.

Односторонняя панель подготавливается тремя панельными выработками: конвейерным 1, транспортным 2 и вентиляционным 3 штреками. Очистные работы ведутся одновременно в двух-трех блоках. Для этого через каждые 180–200 м нарезаются блоковые конвейерный 1', транспортный 2', вентиляционный 3', разгружающий 4 и стартовый 5 штреки. Размеры камер разворота комбайнов (горловин) для засечки камер

определяются паспортом исходя из конкретных параметров очистной выемки.

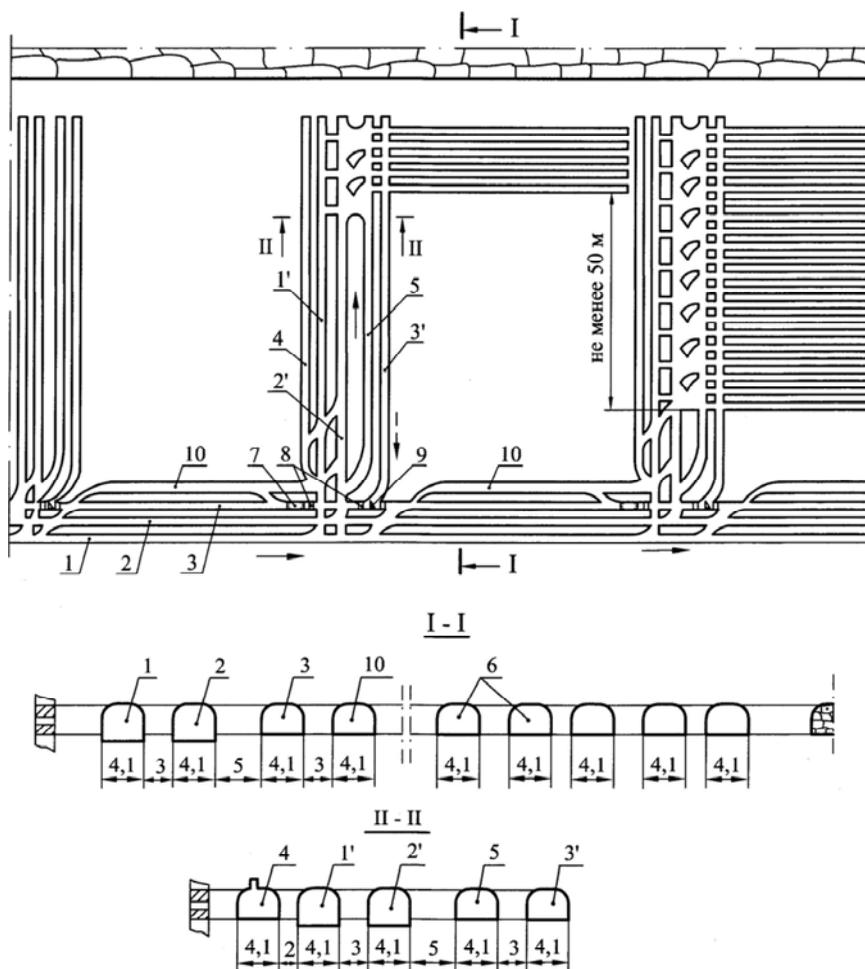


Рис. 4. Технологическая схема камерной системы разработки:  
 1, 2, 3 и 1', 2', 3' – панельные и блоковые конвейерные, транспортные  
 и вентиляционные штреки; 4 – разгружающая выработка; 5 – стартовый  
 штрек; 6 – очистные камеры; 7 – полукроссинги; 8 – вентиляционные  
 перемычки; 9 – вентиляционные восстающие; 10 – выработки  
 складирования породы

Для разделения свежей и исходящей струй воздуха панельный вентиляционный штрек 3 под блоковыми выработками проводится с полукроссингом 7. Последний ограждается от свежей струи вентиляционными перемычками 8 и сбивается с блоковым вентиляционным штреком 3' восстающим 9. Порода от проходки полукроссингов складировается в выработку 10, проводимую в районе панельных штреков. Свежая струя воздуха поступает по панельным и блоковым конвейерным 1 и 1' и транспортным 2 и 2' штрекам с помощью вентилятора местного проветривания омывает очистные забои, затем через блоковый вентиляционный штрек 3', восстающий 9, полукроссинг 7 поступает на панельный вентиляционный штрек и далее к вентиляционному стволу (кроссинг - подземное вентиляционное сооружение, предназначенное для разделения пересекающихся воздушных струй).

Камерные системы разработки подразумевают валовую выемку руды, сейчас разработаны способы селективного извлечения мощных сильвинитовых пластов добычными комбайнами с исполнительным органом типа «горизонтальный барабан»: например, JOY 14СМ или Висугус 25М0 с вынимаемой мощностью от 0,8 до 3,4 м и диаметром режущего барабана 0,8–1,4 метра. Так, отработка камер может вестись заходками с нижнего слоя сильвинита, при этом галит из среднего слоя соляного пласта складировается в соседние камеры (рис. 5).

На рис. 6 представлен вариант технологической схемы, когда отработка запасов блока камерами ведется добычным комбайном избирательного действия из заезда на всю длину камеры – с верхнего слоя сильвинита при одновременном креплении кровли анкерами, а отработанный галит используется в качестве закладочного материала для закладки им части соседних камер в зависимости от мощности слоя галита и коэффициента его разрыхления, с чередованием заложённых и незаложенных камер.

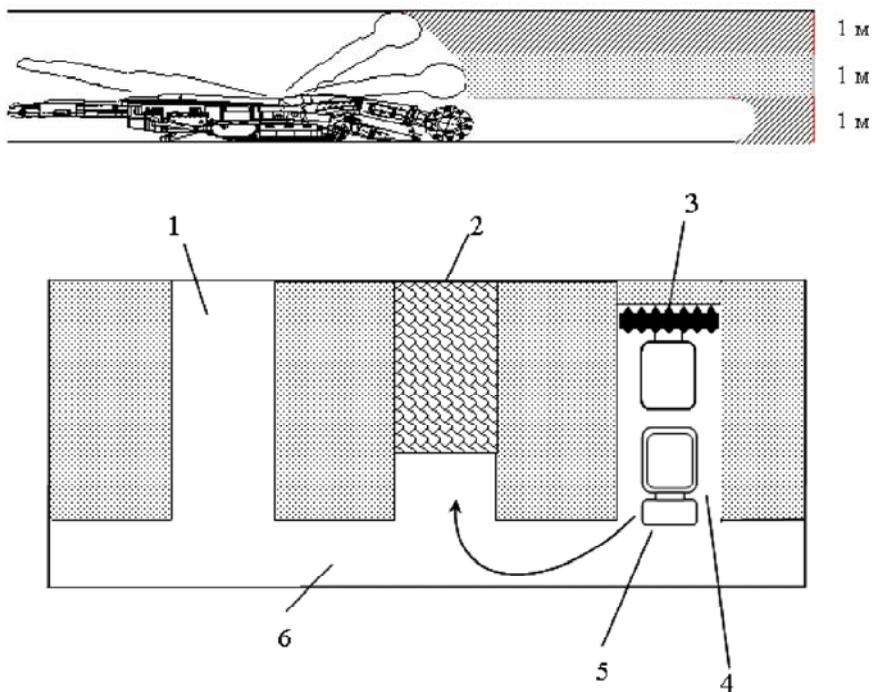


Рис. 5. Селективная выемка комбайном избирательного действия Висугус 25М0:

- 1 – отработанная камера;
- 2 – закладываемая камера;
- 3 – комбайн Висугус 25М0;
- 4 – обрабатываемая камера;
- 5 – самоходное доставочное оборудование;
- 6 – доставочный штрек

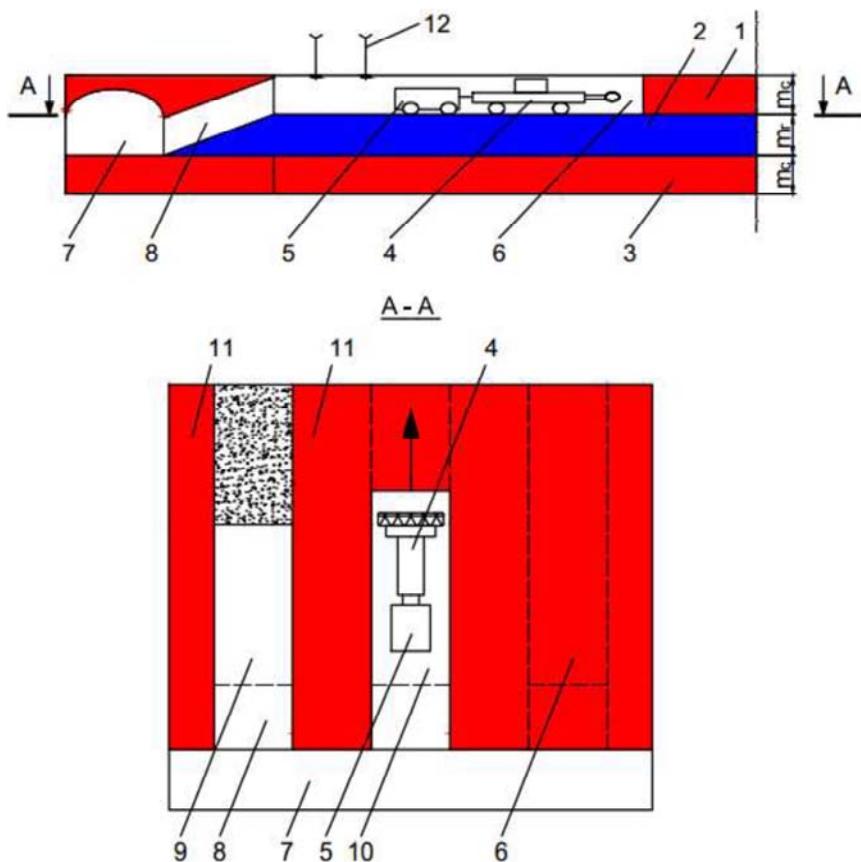


Рис. 6. Технологическая схема послойной выемки мощного калийного пласта:

- 1 – верхний сильвинитовый слой; 2 – галитовый слой; 3 – нижний сильвинитовый слой; 4 – добычной комбайн; 5 – транспортный вагон; 6 – обрабатываемая камера; 7 – подготовительная выработка; 8 – заезд; 9 – камера с закладкой; 10 – отработанная камера; 11 – податливые междукамерные целики; 12 – анкерная крепь

Камерная система разработки с плавной посадкой кровли на податливые, постепенно разрушающиеся целики (рис. 7) обеспечивается использованием комбайнов с регулируемым по высоте рабочим органом. Сближение кровли с почвой в комбайновой заходке (камере) начинается еще до ее полной отработки, для того чтобы

комбайн не оказался зажатым в камере; при отгоне требуется опустить его рабочий орган.

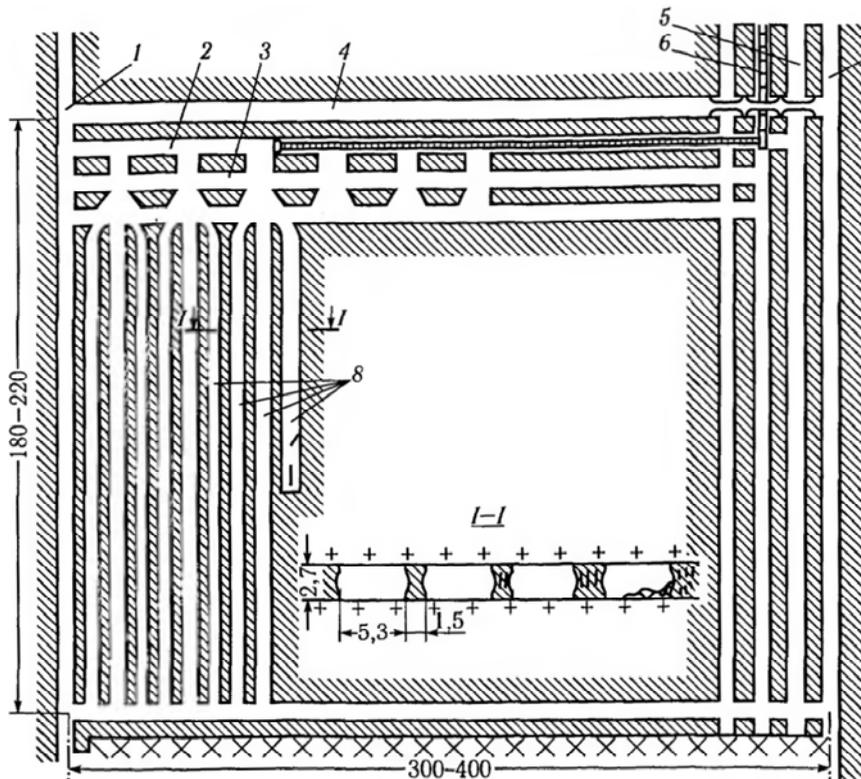


Рис. 7. Камерная система разработки с плавной посадкой кровли на податливых (разрушаемых) целиках:

1 – панельный вентиляционный штрек; 2 – боковой конвейерный штрек; 3 – боковые выемочные штреки; 4 – боковой разгружающий (вентиляционный) штрек; 5 – панельные транспортные штреки; 6 – панельный конвейерный штрек; 7 – вентиляционный штрек следующей панели; 8 – камеры

### Условие прочности опорных целиков при разработке рудных залежей камерными системами

Критерий устойчивого состояния целиков в большинстве методик – не превышение действующих (прогнозируемых) на-

грузок на целик нормируемому по «безопасному» значению (пределу прочности на сжатие).

Все современные методы расчета целиков основаны на расчете по допускаемым напряжениям. Сущность его в том, что напряжения, развиваемые в целике внешними нагрузками (давлением поддерживаемых пород), сравниваются с предельно допустимыми для материала целика, которые устанавливаются в соответствии с какой-либо теорией прочности.

Отношение этих напряжений характеризует запас прочности целика при заданных его размерах, и наоборот, размеры целика при заданном коэффициенте запаса прочности характеризуют отношение напряжений в целиках.

Определение действующих нагрузок и напряжений производится на основе той или иной гипотезы горного давления на целики: в частности, гипотез полного веса столба пород, сплошной среды, балок и плит и др.

Метод, впервые предложенный А. Турнером в 1841 г., затем был развит в трудах Л.Д. Шевякова, Ля Гупиера, М. Стаматиу и др.

Основные положения и допущения этой группы методов:

наибольшая нагрузка на целики создается весом всей толщи пород до поверхности в пределах участка, поддерживаемого целиками;

вертикальные напряжения в горизонтальных сечениях целика считаются равномерно распределенными;

допускаемыми напряжениями считается предел прочности пород целика одноосному сжатию; в него вводятся поправки или коэффициенты, полученные лабораторным путем и характеризующие несущую способность целика;

расположение целиков в форме столбов или длинных стен и камер предполагается регулярным.

Смещения вмещающих пород деформируют целики. Они сжимаются по вертикали и расширяются в горизонтальных

направлениях. Сжатие целика по вертикали  $\Delta$  равно сближению кровли и почвы (рис. 8):

$$\Delta = \Delta' + \Delta'' \quad (2)$$

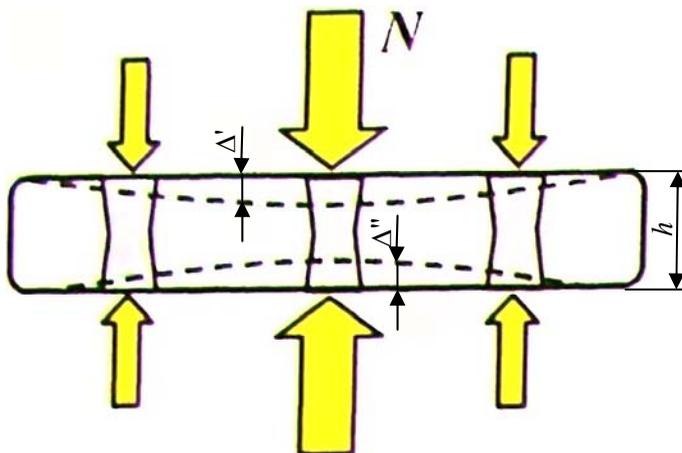


Рис. 8. Схема к расчету нагрузок на целики по принципу совместности деформации целиков и вмещающих пород

Вертикальное сжатие целика приводит к возникновению нагрузки  $N$  на него. Нагрузка на целики в центральной части выработанного пространства, где самые большие смещения вмещающих пород, больше, чем на границе с массивом, так как там конвергенция кровли и почвы минимальна.

Согласно закону Гука относительные деформации  $\epsilon$  твердого тела прямо пропорциональны действующим в нем напряжениям  $\sigma$ , а коэффициентом пропорциональности является модуль упругости  $E$ :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Относительная деформация  $\varepsilon$  есть отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h}. \quad (4)$$

В соответствии с законом Гука, чем больше действующие напряжения и меньше модуль упругости  $E$ , тем больше относительная деформация  $\varepsilon$ .

Рассмотрим целик в виде упругого цилиндра (рис. 9) высотой  $h$  с поперечным сечением  $S_{ц}$ .

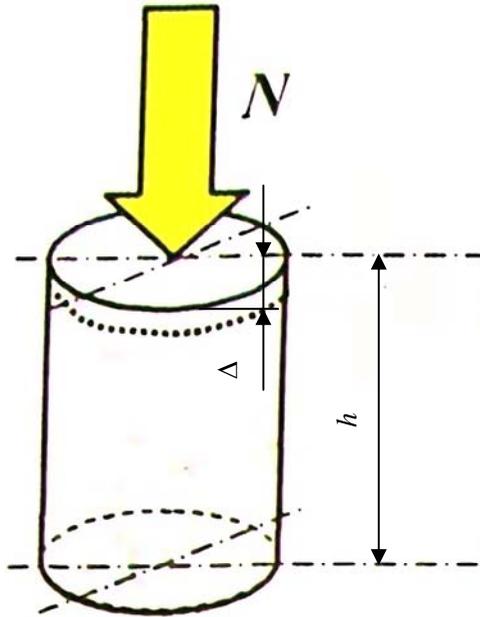


Рис. 9. Схема к расчету нагрузок на целики по принципу совместности деформации целиков и вмещающих пород

Действующие в целике напряжения определяются из соотношения

$$\sigma = \frac{N}{S_{ц}}. \quad (5)$$

Тогда для целика закон Гука примет вид

$$N = \frac{E \cdot \Delta \cdot S_{\text{ц}}}{h}, \quad (6)$$

где  $\frac{E \cdot S_{\text{ц}}}{h}$  – *жесткость целика* обозначают ее  $G$ .

Так, нагрузка на целик  $N$  прямо пропорциональна величине сжатия  $\Delta$  и его жесткости  $G$

$$N = \Delta \cdot G. \quad (7)$$

Следствием этого являются:

неравномерность нагружения целиков по площади выработанного пространства; центральные целики, наиболее удаленные от кромки массива или барьерных, массивных целиков, воспринимают большую нагрузку, чем периферийные (в том числе и находящиеся вблизи забоя), так как смещения вмещающих пород больше в центре очистного пространства (см. рис. 8);

чем жестче целик (больше его площадь и меньше высота), тем большую нагрузку он воспринимает; например, если два рядом стоящих целика имеют разную жесткость, то большую нагрузку несет более жесткий целик, у которого больше сечение и (или) меньше высота.

Влияние жесткости опорных целиков на распределение нагрузки хорошо иллюстрируется эпюрами, показанными на рис. 10 (здесь ширина панельного целика  $c$  больше ширины междукамерного целика  $a$ ).

Следовательно, при прочих равных условиях (при постоянной высоте целика, модуле упругости  $E$ ), характерных для одного очистного блока, нагрузки распределяются пропорционально площади опорного элемента и зависят также от

условий их деформирования (плоское, объемное) – от формы и объема целика.

При расчете размеров опорных целиков должны учитываться указанные особенности их нагружения в составе системы разработки.

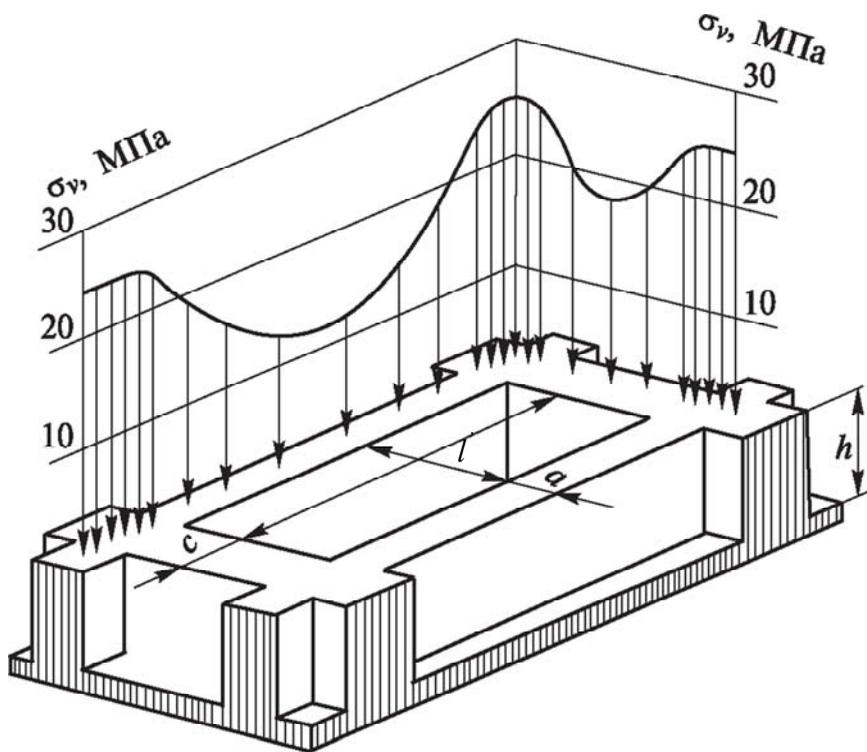


Рис. 10. Распределение вертикальных нагрузок в элементах системы разработки

**Несущей способностью целика** называется величина пригрузки, при которой в целике возникают напряжения, близкие к критическим.

Для определения размеров опорных целиков при камерной системе разработки целики рассматриваются как колонны, на

которые действуют вертикальные нагрузки, соответствующие полному весу вышележащих пород, считая до земной поверхности.

Схема к расчету опорных целиков постоянной длины представлена на рис. 11. Все целики рассчитывают по допустимым напряжениям сжатия, развивающимся в среднем, наиболее слабом их сечении. В качестве допустимых напряжений в теории целиков принимают предел прочности пород при одноосном сжатии.

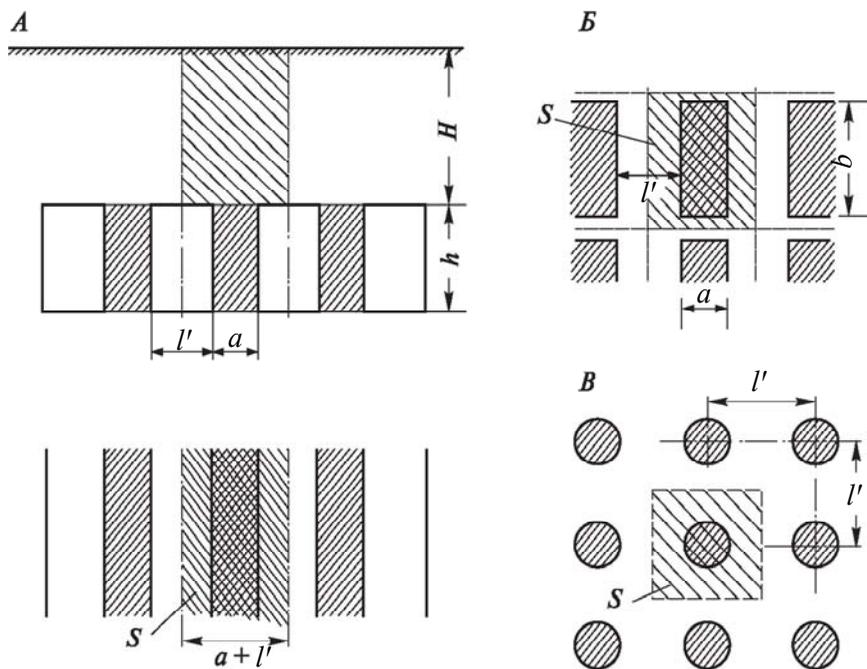


Рис. 11. Схема к расчету размеров опорных целиков:  
 $H$  – глубина разработки;  $h$  – высота целика;  $l'$  – ширина примыкающих к целику камер и выработок;  $a$  – ширина целика;  $S$  – площадь выработанного пространства, приходящаяся на один целик;  $b$  – длина изолированного междукамерного целика

Общее условие прочности, если пренебречь собственным весом целиков, имеет вид

$$\frac{K_n \cdot K_\alpha \cdot \gamma \cdot H \cdot (a+l) \cdot (b+l')}{a \cdot b} = \frac{\sigma_{сж}^0 \cdot K_{с.о} \cdot K_{вр}}{K_{зап}} \cdot K'_\phi \cdot K''_\phi, \quad (8)$$

где  $K_n$  – коэффициент нагрузки, учитывающий долю веса пород налегающей толщи, воспринимаемую целиками;

$K_\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние угла падения рудного тела на величину нагрузки, приходящейся на целик;

$\gamma$  – средний объемный вес пород налегающей толщи, МН/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина разработки, м;

$S_{гр}$  – грузовая площадь, приходящаяся на целик, м<sup>2</sup>;

$S_{ц}$  – площадь поперечного сечения опорного целика, м<sup>2</sup>;

$\sigma_{сж}^0$  – прочность пород при сжатии в образце, МПа;

$K_{с.о}$  – коэффициент структурного ослабления, учитывающий снижение прочности пород в реальном массиве по сравнению с их прочностью в образце;

$K_{вр}$  – коэффициент времени, учитывающий влияние времени на несущую способность целика;

$K_{зап}$  – коэффициент запаса прочности (учитывает способность горных пород сопротивляться нагружению в течение длительного периода времени);

$K'_\phi$  – коэффициент формы целика, учитывающий влияние на его несущую способность, соотношение параметров целика в плане;

$K''_\phi$  – коэффициент формы целика, учитывающий влияние на его несущую способность, соотношение размеров в направлении действия нагрузки (учитывает влияние высоты целика на его устойчивость).

Для изолированных целиков с прямоугольной формой поперечного сечения условие прочности получает вид

$$\frac{K_H \cdot K_\alpha \cdot \gamma \cdot H \cdot (a+l) \cdot (b+l')}{a \cdot b} = \frac{\sigma_{сж}^0 \cdot K_{с.о} \cdot K_{вр}}{K_{зап}} \cdot K'_\phi \cdot K''_\phi, \quad (9)$$

где  $a$  – ширина целика, м;

$b$  – длина изолированного междукамерного целика, м;

$l$  – предельно допустимый устойчивый пролет горизонтального обнажения, м;

$l'$  – ширина примыкающих к целику камер и выработок, м.

Для столбчатых целиков с круглыми поперечным сечением условие прочности имеет вид

$$\frac{4K_H \cdot K_\alpha \cdot \gamma \cdot H \cdot (d_\text{ц} + l)^2}{\pi \cdot d_\text{ц}^2} = \frac{\sigma_{сж}^0 \cdot K_{с.о} \cdot K_{вр}}{K_{зап}} \cdot K''_\phi, \quad (10)$$

где  $d_\text{ц}$  – диаметр целика, м.

### Порядок определения размеров целиков

Расчет изолированных междукамерных целиков осуществляется в следующей последовательности. Обозначим в формуле (8):

$$\frac{K_H \cdot K_\alpha \cdot \gamma \cdot H \cdot K_{зап}}{\sigma_{сж}^0 \cdot K_{с.о} \cdot K_{вр}} = q, \quad (11)$$

тогда для изолированных междукамерных целиков с прямоугольной формой поперечного сечения условие прочности преобразуется в рабочий вид:

$$q \cdot (a+l) \cdot (b+l') = a \cdot b \cdot K'_\phi \cdot K''_\phi. \quad (12)$$

Необходимо определить ширину и длину целика. Задача решается методом последовательного подбора.

1. Задают значение ширины целика  $a$  при условии, что  $a < h$  ( $h$  – высота междукамерного целика, м).

2. В рабочее уравнение значения подставляют значения  $q, l, l', K'_\phi, K''_\phi$ .

3. Определяют длину целика  $b$ .

4. Если полученное значение удовлетворяет условию  $1 \leq \frac{a}{b} \leq 4$ , решение считают окончательным.

5. Если окажется, что  $b < a$ , то решение повторяется при меньшем значении  $a$  до тех пор, пока не будет удовлетворено условие

$$1 \leq \frac{a}{b} \leq 4.$$

Для целиков с квадратной формой поперечного сечения расчетная формула имеет вид

$$q \cdot (a+l)^2 = a^2 \cdot K''_\phi. \quad (13)$$

Из (13) определяют  $a$  – размер стороны целика квадратной формы.

Для целиков круглого сечения:

$$4 \cdot q \cdot (d_\text{ц} + l)^2 = \pi \cdot d_\text{ц}^2 \cdot K''_\phi. \quad (14)$$

Из (14) определяют  $d_\text{ц}$  – диаметр целика круглой формы.

### **Определение коэффициента формы**

Устойчивость целика и его несущая способность зависят от соотношения его высоты  $h$ , ширины  $a$  и длины  $b$ . Влияние со-

отношения параметров целика в сечении, перпендикулярном направлению нагрузки, учитывается  $K'_{\phi}$ .

Влияние параметров в сечении, совпадающих с направлением действия нагрузки, учитывается  $K''_{\phi}$ .

при  $0,25 \leq \frac{a}{h} \leq 4$ ,

$$K''_{\phi} = 0,6 + 0,4 \cdot \frac{a}{h}; \quad (15)$$

при  $1 \leq \frac{a}{h} \leq 4$ ,

$$K''_{\phi} = \frac{a}{h}. \quad (16)$$

При тех же условиях, но в слаботрешиноватых породах

$$K''_{\phi} = \sqrt{\frac{a}{h}}. \quad (17)$$

Если междукамерный целик имеет прямоугольную форму, а соотношение его параметров в плане соответствует условию

$1 \leq \frac{b}{a} \leq 4$ , то

$$K'_{\phi} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{b}{a}. \quad (18)$$

Ориентировочное значение коэффициента структурного ослабления ( $K_{с.о}$ ) для пород различной степени нарушенности, работающих на сжатие, приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Ориентировочное значение коэффициента  
структурного ослабления ( $K_{с.о}$ )**

Степень нарушенности пород трещинами	Значения $K_{с.о}$
Слаботрещиноватые	0,45
Среднетрещиноватые	0,3–0,45
Сильнотрещиноватые	0,15–0,30
Раздробленные	0,15
Соляные породы	$\geq 0,9$

Рекомендуемые значения коэффициента нагрузки, учитывающего долю веса пород налегающей толщи, воспринимаемую целиками  $K_n$ , приведены в табл. 2 ( $L$  – длина по простиранию).

Таблица 2

**Значения коэффициента нагрузки  $K_n$**

$\frac{L}{H}$	При незначительной податливости целиков	При значительной податливости целиков, наличие слабых прослоек
0,1	0,6	0,4
0,3	0,8	0,6
0,5	0,9	0,8
0,7	1,0	0,9
0,8 и более	1,0	1,0

Коэффициент  $K_\alpha$ , учитывающий влияние угла падения рудного тела  $\alpha$  на величину нагрузки, приходящейся на междукамерный целик, рассчитывается из следующих выражений.

Для ленточных и прямоугольных целиков, расположенных длинной осью по падению-восстанию:

$$K_{\alpha} = \cos^2 \alpha + \eta \cdot \sin^2 \alpha. \quad (19)$$

При их ориентации по простиранию:

$$K_{\alpha} = \frac{\eta \cdot \sin \alpha}{\cos \beta \cdot \sin(\alpha - \beta)}, \quad (20)$$

где  $\beta = \alpha - \arctg(\eta \cdot \tg \alpha)$ ;

$\eta = \frac{\mu}{1 - \mu}$  – коэффициент бокового распора;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Коэффициент запаса прочности  $K_{\text{зап}}$  учитывает факторы со случайным характером влияния:

$$K_{\text{зап}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (21)$$

где  $K_1$  учитывает отклонение средней прочности породы, принятой в расчете, от минимальной прочности образца по результатам испытаний, принимается из диапазона 1,25–1,35;

$K_2$  учитывает неравномерность распределения напряжений в опасных сечениях целика, принимается из диапазона 1,2–1,3;

$K_3$  учитывает возможное отклонение фактических размеров целиков и камер от их расчетной величины; принимается из диапазона 1,1–1,5.

В различных условиях  $K_{\text{зап}}$  принимается равным от 1,5 до 3 и в особых случаях 5.

Рекомендуемые значения коэффициента, учитывающего влияние времени на несущую способность целика ( $K_{\text{вр}}$ ), приведены в табл. 3.

Значения коэффициента  $K_{вр}$ 

Срок службы целика	Значение $K_{вр}$	
	слабо- и средне-трещиноватые породы	сильнотрещиноватые или пластичные породы
До 2	1,0	1,0
2–5	0,8	0,7
Свыше 5	0,7	0,5

Ширина жестких междукамерных целиков  $a_{ж}$  на Старобинском месторождении при применении камерной системы разработки по условию обеспечения безопасной отработки камеры определяется по формуле

$$a_{ж} = \left( N \cdot l \cdot \left( \frac{1}{\rho} \cdot e^x \cdot f \cdot H - 1 \right) - a_i \cdot (N - 1) \right) \cdot \sqrt{\frac{h}{h_c}}, \quad (22)$$

где  $N$  – число очистных ходов в камере;

$l$  – ширина очистного хода, м;

$H$  – глубина разработки, м;

$a_i$  – ширина поддерживающего (внутрикамерного) целика, м,  $a_i = 1,2-1,5$  м, для одноходовых очистных камер  $a_i = 0$ ;

$1/\rho, f$  – коэффициенты (для пород, относящихся к I и II типам по классификации Открытого акционерного общества «Белгорхимпром»,  $1/\rho = 1,33; f = 0,0007$ ); относящихся к III типу –  $1/\rho = 0,84; f = 0,00124$ );

$H$  – высота целика в проектируемом очистном ходе, принимается не более 4,0 м;

$h_c$  – то же в стандартном очистном ходе (для комбайна типа ПК-8  $h_c = 3,0$  м);

$e^x$  – экспоненциальная функция, значения которой приведены в табл. 4.

**Экспоненциальная функция ( $e^x$ )  
для значений аргумента ( $f \cdot H$ ) от 0,2 до 0,9**

$e^x$	Значения аргумента ( $f \cdot H$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,2	1,2214	1,2337	1,2461	1,2586	1,2712	1,2840	1,2969	1,3100	1,3231	1,3364
0,3	1,3499	1,3634	1,3771	1,3910	1,4049	1,4191	1,4333	1,4477	1,4627	1,4770
0,4	1,4918	1,5068	1,5220	1,5373	1,5527	1,5683	1,5841	1,6000	1,6161	1,6323
0,5	1,6487	1,6653	1,6820	1,6989	1,7160	1,7333	1,7507	1,7683	1,7860	1,8040
0,6	1,8221	1,8404	1,8589	1,8776	1,8905	1,9155	1,9348	1,9542	1,9739	1,9937
0,7	2,0138	2,0340	2,0544	2,0751	2,0950	2,1170	2,1383	2,1596	2,1815	2,2034
0,8	2,2255	2,2479	2,2705	2,2933	2,3164	2,3396	2,3632	2,3869	2,4109	2,4351
0,9	2,4596	2,4843	2,5093	2,5345	2,5600	2,5857	2,6117	2,6379	2,6645	2,6912

При работе по технологии с оставлением податливых целиков по условию беспрепятственного отгона комбайна из камеры допустимая ширина податливого целика  $a$  определяется по формуле, установленной эмпирическим путем для условий Старобинского месторождения:

$$a = 0,214 \cdot \left( 2,44 + \frac{3,1 \cdot t}{7,3 - 0,0093 \cdot H} \right), \quad (23)$$

где  $t$  – время нахождения комбайна в камере, сутки;

$H$  – глубина разработки, м.

Для Старобинского месторождения минимальная ширина податливого целика должна приниматься равной 1,2 м.

Относительные потери для ленточных целиков определяются по формуле

$$p = \frac{a}{l' + a}. \quad (24)$$

## Демонстрационный пример

Определить оптимальные параметры междукамерных целиков с прямоугольной формой поперечного сечения. Разработку пологопадающей рудной залежи предполагается осуществить камерной системой разработки.

Исходные данные для расчета:

глубина  $H = 200$  м;

длина по простиранию  $L = 400$  м;

$\gamma = 0,026$  МН/м<sup>3</sup>;

$\alpha = 20^\circ$ ;

$h = 5$  м;

$\sigma_{сж} = 120$  МПа;

$K_{с.о} = 0,4$ ;

$l = 12$  м;

$l' = 8$  м;

$\mu = 0,3$ ;

срок службы целиков – 5 лет.

### Решение

1.1. Рассчитываем  $K'_\phi$ ,  $K''_\phi$  по формулам

$$K'_\phi = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{b}{a},$$

$$K''_\phi = 0,6 + 0,4 \cdot \frac{a}{h}.$$

Принимаем по таблицам  $K_n = 1$ ,

$$\eta = \frac{0,3}{1 - 0,3} = 0,43,$$

$$K_\alpha = \cos^2 20^\circ + 0,43 \sin^2 20^\circ = 0,93.$$

По таблицам  $K_{вр} = 0,7$ ,  $K_1 = 1,3$ ,  $K_2 = 1,25$ ,  $K_3 = 1,1$ .

Принимаем ориентировочные значения  $a = 3$  м, подставим исходные данные в выражение (12) и получим:

$$\frac{1,0 \cdot 0,93 \cdot 0,026 \cdot 200 \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot (3+12) \cdot (8+b)}{120 \cdot 0,4 \cdot 0,7} =$$
$$= 3 \cdot b \cdot \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{b}{3}\right) \cdot \left(0,6 + 0,4 \cdot \frac{3}{5}\right).$$

После преобразования

$$b^2 - 10,1 \cdot b - 170,6 = 0,$$

откуда

$$b = 5,05 \pm \sqrt{5,05^2 + 170,6} = 5,05 \pm 14.$$

Поскольку при таком значении  $b$  условие  $\frac{b}{a} \leq 4$  не соблюдается, повторяем расчет при  $a = 6$  м с соответствующим изменением коэффициента формы:

$$\frac{1,0 \cdot 0,93 \cdot 0,026 \cdot 200 \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot (6+12) \cdot (8+b)}{120 \cdot 0,4 \cdot 0,7} =$$
$$= 6 \cdot b \cdot \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{b}{6}\right) \cdot \frac{6}{5}.$$

После преобразования получено квадратное уравнение

$$b^2 + 3,1 \cdot b - 167 = 0,$$

откуда

$$b = -1,55 \pm \sqrt{2,4 + 167} = -1,55 \pm 13.$$

Принимаем  $b = 11,5$ .

Таким образом, результат расчета:  $a = 6$  м;  $b = 11,5$  м.

## Задания

### Задача 1

Определить параметры круглых, квадратных и ленточных целиков. Разработку пологопадающей рудной залежи предполагается осуществить камерной системой разработки.

Поддержание выработанного пространства при этой системе осуществляется рудными целиками. Коэффициент нагрузки  $K_n$  принять равным 1.

Данные для расчета прочных размеров целиков представлены в табл. 5–7.

Для решения задачи следует:

- 1) изучить методику определения оптимальных параметров элементов системы разработки рудных месторождений;
- 2) получить исходные данные у преподавателя. Исходными данными для выполнения работы являются значения в табл. 5–7 в соответствии с номером варианта;
- 3) оформить отчет;
- 4) выписать в отчет исходные данные в виде табл. 5;
- 5) выполнить необходимые расчеты;
- 6) проанализировать полученные результаты;
- 7) сформулировать выводы.

### Задача 2

Используя данные задачи 1, из условия прочности (8) получить зависимость допустимой ширины междукамерных целиков при камерной системе разработки пологопадающей рудной залежи от глубины отработки  $f = a(H)$ .

Для решения задачи следует:

- 1) выразить ширину целика через другие параметры условия прочности (8), считая  $H$  переменной;
- 2) изменение глубины отработки принимаем от 150 до 500 м, с периодичностью (шагом)  $\delta = 50$  м;

- 3) выполнить необходимые расчеты, занести в таблицу значения  $H$  и соответствующие им значения  $a$ ;
- 4) построить график зависимости  $f = a(H)$ ;
- 5) проанализировать полученные результаты;
- 6) сформулировать выводы.

Данные для расчета прочных размеров целиков для вариантов 1 – 10

Показатели	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощность налегающих пород $H$ , м	350	270	280	200	250	220	240	260	240	280
Высота целика $h$ , м	5	4	3	4	5	3	6	5	3	4
Предельно допустимый устойчивый пролет горизонтального обнажения $l$ , м	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ширина камеры $l'$ , м	6	3,2	7	8	6	10	9	4	3,2	3,4
Срок службы целиков, лет	5	5	5	4	4	3	3	5	5	5
Средний объемный вес пород налегающей толщи $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	0,02	0,024	0,026	0,028	0,022	0,024	0,028	0,029	0,026	0,026
Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}^0$ , МПа	24	29	27	36	33	26	30	25	32	34
Коэффициент запаса прочности $K_{зап}$	2,9	3,1	3,0	2,8	2,9	3,0	3,1	2,5	3,2	3,0
Коэффициент времени, учитывающий влияние времени на несущую способность целика, $K_{вр}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Коэффициент структурного ослабления, учитывающий снижение прочности пород в реальном массиве по сравнению с их прочностью в образце, $K_{с.о}$	0,4	0,7	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4	0,9	0,7	0,8
Угол падения рудного тела, $\alpha$	5	5	6	9	6	7	8	5	10	9
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3



Данные для расчета прочных размеров целиков для вариантов 21 – 30

Показатели	Вариант											
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Мощность налегающих пород $H$ , м	270	260	220	230	270	340	300	230	200	270		
Высота целика $h$ , м	4	3,4	4	3	3	4	3	4	3	4		
Предельно допустимый устойчивый пролет горизонтального обнажения $l$ , м	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
Ширина камеры $l'$ , м	5	6	3,2	7	7	6	8	8	6	3,2		
Срок службы целиков, лет	5	3	3	5	5	5	5	5	5	4		
Средний объемный вес пород налегающей толщи $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	0,022	0,024	0,028	0,029	0,026	0,026	0,02	0,024	0,026	0,028		
Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}^0$ , МПа	31	26	28	25	31	34	30	26	27	33		
Коэффициент запаса прочности $K_{зап}$	2,9	1,4	1,1	1,1	3,2	3	1,3	1,2	3	2		
Коэффициент времени, учитывающий влияние времени на несущую способность целика, $K_{вр}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7		
Коэффициент структурного ослабления, учитывающий снижение прочности пород в реальном массиве по сравнению с их прочностью в образце, $K_{с.о}$	0,4	0,8	0,7	0,4	0,4	0,9	0,4	0,7	0,7	0,8		
Угол падения рудного тела, $\alpha$	7	7	8	5	6	9	5	5	6	7		
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агошков, М.И. Разработка рудных и нерудных месторождений: учебник для техникумов / М.И. Агошков, С.С. Борисов, В.А. Боярский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1983. – 424 с.

2. Иванцов, В.М. Подземная разработка рудных месторождений : учеб. пособие-практикум для организации самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению подготовки 130400 «Горное дело» / В.М. Иванцов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 136 с.

3. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2010. – 124 с.

4. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2010. – 152 с.

5. Казикаев, Д.М. Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд : учеб. пособие / Д.М. Казикаев, Г.В. Савич. – 2-е изд. – М. : Горная книга, 2013. – 224 с.

6. Макаров, А.Б. Практическая геомеханика : пособие для горных инженеров / А.Б. Макаров. – М. : Горная книга, 2006. – 380 с.

7. Петровский, Б.И. Взаимодействие механизированных крепей с кровлей при разработке Старобинского месторождения калийных солей / Б.И. Петровский, В.А. Губанов. – М. : Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2003. – 152 с.

8. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых : метод. указания для выполнения лабораторных работ / сост.: О.З. Габараев, Г.Н. Хугаева. – Сев.-Кавказ. горно-металлур. ин-т. – Владикавказ : Терек, 2014. – 85 с.

9. Подземная разработка пластовых месторождений. Теоретические и методические основы проведения практических занятий : учеб. пособие / под ред. Л.А. Пучкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МГГУ, 2001. – 487 с.

10. Сиренко, Ю.Г. Совершенствование селективной выемки мощных калийных пластов при камерной системе разработки / Ю.Г. Сидоренко, М.Ю. Бычков, Е.Р. Ковальский // Зап. Горного ин-та: полезные ископаемые России и их освоение. – СПб., 2010. – Т. 186. – С. 79–81.

11. Сиренко, Ю.Г. Организация селективной выемки мощных калийных пластов при камерной системе разработки / Ю.Г. Сидоренко [и др.] // Зап. Горного ин-та: полезные ископаемые России и их освоение. – СПб., 2007. – Т. 172. – С. 113–116.

12. Технология подземной разработки калийных руд / В.Г. Зильбершмидт [и др.]. – М. : Недра, 1977. – 287 с.

Учебное издание

## **ГОРНОЕ ДЕЛО**

Практикум  
для студентов специальности  
1-36 10 01 «Горные машины и оборудование  
(по направлениям)»

Составители:

**БЕРЕЗОВСКИЙ** Николай Иванович  
**КОСТЮКЕВИЧ** Елена Казимировна

Редактор *Т. В. Мейкишане*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 21.03.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 100. Заказ 676.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.