

М. СТАМАТИУ

РАСЧЕТ ЦЕЛИКОВ НА СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО.
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ
Москва 1963

Перевод с румынского Г. П. Махо
под редакцией докт. техн. наук К. В. Руппенейта

АННОТАЦИЯ

В книге дается сжатое описание всевозможных методов расчета целиков. Автор, не ограничиваясь рассмотрением теорий, на конкретных примерах, взятых из производственной практики, производит расчеты целиков различными методами и на основании анализа устанавливает область применения этих методов и приводит необходимые для расчетов исходные данные. Хотя работа написана по материалам соляных рудников Румынии, ее рекомендации могут быть использованы при разработке пластовых месторождений в других районах.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников-производственников, проектировщиков и научных работников горной промышленности.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Скончавшийся 21 ноября 1958 г. профессор М. Стаматиу известен как крупнейший специалист в области разработки месторождений камерным способом. За исследование проблем разработки соляных рудников Румынии ему первому из румынских инженеров была присвоена высшая в Германии ученая степень Доктора хабилютатус.

М. Стаматиу является автором многих серьезных научных работ по изучению механических свойств горных пород и расчету целиков и потолочин.

Мировую известность получили его фундаментальные исследования прочностных свойств румынской каменной соли, в которых, в частности, была изучена зависимость прочности образцов при одноосном сжатии от величины и отношения размеров образца.

Следует отметить, что на протяжении всей своей деятельности проф. М. Стаматиу наряду с активной преподавательской и научной работой был непосредственно связан с решением практических проблем разработки полезных ископаемых.

Именно этим и объясняется то, что в предлагаемой читателю книге М. Стаматиу органически сочетается научный разбор различных теорий расчета целиков оценкой их достоинств и недостатков с позиций практики. Монография М. Стаматиу посвящена расчетам целиков на соляных месторождениях Румынии, однако ее значение выходит далеко за пределы этой узкой тематики, так как критический разбор различных теорий расчета целиков сохраняет свое значение независимо от вида полезного ископаемого, а приводимые практические примеры расчета, хотя и основаны на опыте разработки румынских соляных рудников, легко распространяются на другие условия.

Поскольку в отечественной литературе нет достаточно полного обзора существующих предложений по определению раз-

меров междукammerных целиков книга М. Стаматиу восполняет этот пробел. Несомненным достоинством книги является также то, что все существующие методы расчета целиков иллюстрированы числовыми примерами; результаты решений по различным методам сравнены между собой и с данными практики разработки соляных месторождений. Поэтому книга М. Стаматиу представляет значительный интерес и будет полезной для инженерно-технических работников горной промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки многих полезных ископаемых (каменной соли, солей калия и магния, некоторых железных руд, каменного угля, гипса, мела и строительных материалов) применялась и продолжает применяться так называемая камерно-столбовая система.

Эта же система независимо от ценности полезного ископаемого применяется в тех случаях, когда необходимо избежать значительных смещений земной поверхности, например при подработке больших водоемов, главных путей сообщения, городов, фабрик, заводов и т. д., если другие системы, например с закладкой, слишком дороги.

При разработке камерно-столбовой системой полезное ископаемое добывается в камерах различного сечения.

Между камерами оставляют целики полезного ископаемого, назначением которых является восприятие нагрузок от веса вышележащей толщи пород и предотвращение обрушения кровли и смещения земной поверхности.

Правильно рассчитанные целики должны обеспечить:

- а) безопасность людей, осуществляющих добычу;
- б) предотвращение смещений поверхности;
- в) возможно меньшие потери полезного ископаемого.

За последние сто лет задача определения размеров целиков занимала умы многих исследователей.

Для определения оптимальных, с технико-экономической точки зрения, размеров целиков было предложено несколько методов расчета по эмпирическим и полуэмпирическим формулам. Все эти методы рассматриваются в первой части книги.

Во второй части книги производится практическая проверка рассмотренных методов расчета путем определения размеров целиков для конкретных условий соляных рудников Румынской Народной Республики.

Путем сравнения методов расчета были выявлены формулы, наиболее хорошо обеспечивающие условия безопасности и экономичности, а также определена область их применения.

В заключительной части настоящей работы сделана попытка дать метод расчета целиков между камерами цилиндрической формы при разработке соли растворением.

Для расчетов помимо литературных источников были использованы данные лабораторных испытаний, проведенных в геотехнической лаборатории геологического комитета РНР, а также результаты натурных наблюдений за целиками на ряде рудников.

Выводы, к которым мы пришли, изучая соляные рудники, применимы и для разрабатываемых камерно-столбовой системой месторождений угля, руд и других полезных ископаемых, разумеется с учетом геологических и физико-механических их характеристик.

Часть первая
ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ЦЕЛИКОВ

Глава I

ДАННЫЕ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА¹

Для определения оптимальных размеров целиков необходимо знать:

- 1) вид, величину и распределение напряжений в целике;
- 2) способность материала целика сопротивляться возникающим в нем усилиям;
- 3) вид и величину деформаций целика при данной нагрузке.

Рассмотрим вкратце взгляды различных исследователей на эти исходные данные.

Величина и распределение напряжений в целике

В настоящее время общепризнано, что оставляемые при камерно-столбовой системе целики воспринимают лишь статическую сжимающую нагрузку от собственного веса, а также от части веса залежи и боковых пород.

Эта нагрузка, названная автором [42] литостатическим давлением вмещающих залежь пород, вызвана силами тяготения.

Под действием литостатического давления в целике обычно возникают сжимающие напряжения, зависящие как от формы и размеров целика, так и от геологических и петрографических свойств полезного ископаемого (происхождения, напластования, геологических нарушений).

Большинство исследователей в области механики горных пород допускает, что литостатическое давление в ненарушенном какими-

¹ Мы сохранили обозначения, принятые различными авторами в опубликованных работах.

либо горными выработками массиве выражается следующими формулами (в системе прямолинейных прямоугольных координат):
вертикальное литостатическое давление

$$P_v = \sigma_z = \gamma H, \text{ т/м}^2; \quad (1)$$

горизонтальное литостатическое давление

$$P_r = \sigma_x = \sigma_y = \frac{P_v}{m-1} = \frac{\mu}{1-\mu} P_v, \quad (2)$$

где γ — средний объемный вес вышележащих пород, включая полезное ископаемое, т/м^3 ;

H — расстояние от земной поверхности, м ;

m — среднее число Пуассона для соответствующей толщи пород;

$\mu = \frac{1}{m}$ — средний коэффициент Пуассона для соответствующей толщи пород;

σ_x и σ_y — нормальные компоненты тензора напряжений вдоль двух горизонтальных осей, т/м^2 ;

σ_z — нормальный компонент тензора напряжений вдоль вертикальной оси, т/м^2 .

При проходке камер напряженное состояние массива существенно изменяется.

Относительно величины и распределения напряжений в целиках мнения исследователей пока расходятся.

Так опыты, проведенные Дорштевицем [20] методом фотоупругости с эквивалентными материалами, показали, что у кромок целиков имеет место концентрация сжимающих напряжений, зависящая от ряда факторов (формы и размеров целиков, расстояния между ними, свойств полезного ископаемого, почвы и кровли и т. д.).

На рис. 1 приведена картина распределения напряжений в почве и кровле камер. В качестве эквивалентного материала был принят декорит — синтетическое вещество с ярко выраженными упругими и оптическими свойствами. Нагрузка составляла 400 кг. Линии на рисунке соединяют точки с одинаковыми нормальными напряжениями.

На контуре целика коэффициент концентрации сжимающих напряжений равен 3, растягивающих — 0,75.

На рис. 2 приведена фотография модели того же опыта.

Из этих рисунков следует, что напряжения распределяются неравномерно по горизонтальному сечению целика, возрастая у его кромок. В приводимом опыте коэффициент концентрации напряжений по отношению к ненарушенному массиву равен 3.

По данным Г. А. Афендика [1], также методом фотоупругости получено, что сжимающие напряжения распределяются почти равномерно по горизонтальному сечению целика, равняясь $1,5p$ на его оси и $1,58p$ — на кромках, где p — напряжения в ненарушенном массиве.

Акад. Л. Д. Шевяков, основываясь на экспериментах Г. А. Афендика [1] и Б. П. Бакки [16—18], сделал вывод о равномерном рас-

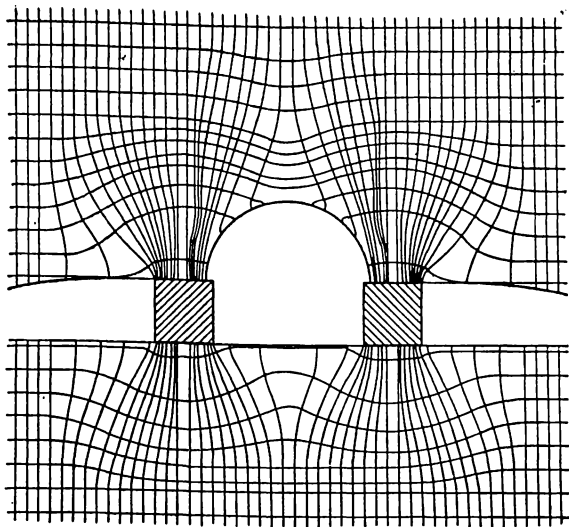


Рис. 1. Распределение напряжений в массиве около опорных целиков (по Г. Дорштевицу)

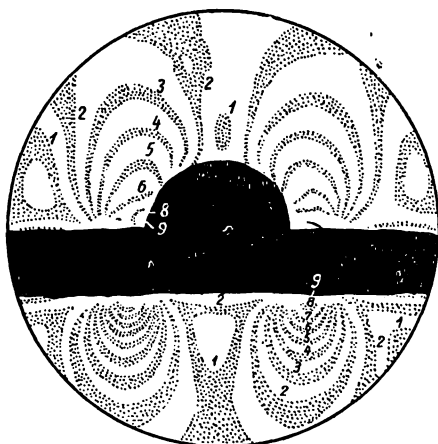


Рис. 2. Картина изохром к рис.1 (по Г. Дорштевицу)

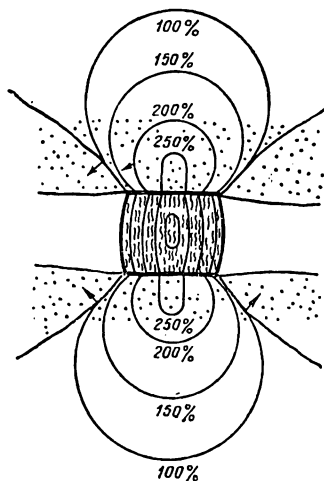


Рис. 3. Распределение напряжений в опорном целике, а также в породах почвы и кровли (по К. Кегелю)

пределении сжимающих напряжений по горизонтальному сечению целика [8].

Акад. Кегель [31, 32] считает распределение напряжений по горизонтальному сечению целика неравномерным с концентрацией напряжений в центральной части целика (рис. 3).

По нашему мнению, гипотеза равномерного распределения напряжений по горизонтальному сечению целика вполне оправдана, с тем однако условием, чтобы при расчете принять увеличенный коэффициент запаса, учитывающий, в частности, концентрацию у кромок, обнаруженную вышеупомянутыми опытами.

Относительно величины нагрузки на целики мнения исследователей также расходятся. Они будут рассмотрены ниже при изложении соответствующих методов расчета.

Способность материала целика сопротивляться различным видам возникающих в нем усилий¹

Как указывалось выше, целики работают в условиях одноосного или реже двух- и трехосного сжатия, поэтому представляется весьма важным знать сопротивление целика раздавливанию.

Лабораторные испытания с целью определения предела прочности на сжатие, растяжение, изгиб и срез горных пород и полезных ископаемых, добываемых камерно-столбовой системой, проводились, начиная с 1884 г. [50], многими исследователями в разных странах.

Обычно испытывали образцы кубической формы, размеры которых назначали в зависимости от крепости пород и мощности прессы.

Эти размеры таковы:

Для пород очень крепких	4×4×4 см
	5×5×5 см
Для пород крепких	5×5×5 см
	10×10×10 см
Для пород средней крепости	10×10×10 см
	15×15×15 см
Для пород мягких	15×15×15 см
	20×20×20 см
	и более

¹ М. Стаматину очень нечетко различает понятия «прочность», т. е. удельное сопротивление разрушению некоторого тела (образца, целика), и «предел прочности». Предел прочности — это величина, характеризующая свойства материала, и она не может зависеть от геометрических размеров или формы образца. При экспериментах определяется не предел прочности, а разрушающая нагрузка для образца, которая зависит от его формы, размеров, качества изготовления и т. п. По разрушающей нагрузке находится условное среднее разрушающее напряжение, которое при одних условиях эксперимента может быть довольно близким к пределу прочности, а при других — отличаться в любое число раз. Поэтому при переводе книги в соответствии со смыслом, который был ясен из текста, выбирался наиболее подходящий термин и проводилось различие между понятиями «сопротивление (прочность)» — в смысле несущая способность тела и «предел прочности» — в смысле физическое свойство материала. (Прим. ред.).

В табл. 1 приведены средние величины прочности некоторых пород и полезных ископаемых на сжатие, растяжение и срез, полученные различными исследователями.

Таблица 1

Порода	Объемный вес γ , т/м ³	Средняя величина сопротивления, кг/см ²		
		сжатию R_c	растяжению R_p	срезу R_{cp}
Сланец	2,60—2,70	800—1200	130—150	30—50
Базальт	2,60—3,10	1000—3000	50—80	150—200
Известняк	2,00—2,75	200—1500	15—50	30—110
Уголь	1,10—1,40	30—210	—	—
Мел	1,30—1,50	15—60	2—10	2—10
Диабаз	2,70—3,30	2900—4000	50—180	150—300
Диорит	2,70—3,30	800—2000	20—50	80—110
Доломит	2,10—2,95	450—1200	10—30	60—180
Гипс	2,20—2,40	170—300	10—40	10—30
Гнейс	2,50—2,70	700—1800	20—60	90—130
Гранит	2,50—2,80	1200—2000	30—80	100—140
Песчаник	1,80—2,75	200—1700	20—60	30—150
Мрамор	2,50—2,80	500—1500	40—50	70—90
Руда из Бая Спринг ¹	2,44—3,78	255—2285	20—159	57—327
Порфир	2,30—2,80	500—2600	30—80	140—200
Каменная соль ¹	2,10—2,20	190—430	5—28	25—54
Глинистый сланец	2,40—2,60	140—750	150—180	300—350
Туфы	1,30—2,40	30—50	3—5	10—15

¹ Опыты автора.

Большинство исследователей, занимающихся расчетом целиков, считали, что сопротивление данной породы сжатию не зависит от размеров испытываемого образца (чаще всего куба).

В результате многочисленных испытаний образцов каменной соли, проведенных с 1933 г. [41] и обобщенных автором в 1937 г. [43], установлено, что сопротивление каменной соли сжатию зависит от формы и размеров образцов. При испытании образцов кубической формы сопротивление соли сжатию растет с увеличением размеров образцов [43]*.

Дальнейшие испытания образцов других пород (туфы из области Плоешти и песчаники из различных областей страны) в точности подтвердили эту закономерность, имеющую большое практическое значение [48].

Испытания, проведенные другими исследователями, подтвердили возрастание сопротивления раздавливанию при увеличении размеров образца кубической формы.

* Стр. 50—53 и диаграммы на рис. 24 в работе [43].

Ниже приводятся обработанные методами математической статистики средние результаты этих испытаний (в долях R_c):

			Породы (по А. Ранну)	Каменная соль (по М. Стаматиу)
Кубики	4×4×4	см	1,00	—
»	5×5×5	»	1,09	1,00
»	7×7×7	»	1,27	—
»	10×10×10	»	1,36	1,27
»	15×15×15	»	1,64	1,36
»	20×20×20	»	1,84	1,50

Эти данные подтверждают закон возрастания сопротивления раздавливанию при увеличении размеров образца кубической формы. Этому закону подчиняются, по-видимому, все горные породы и полезные ископаемые.

Кроме того, было установлено [43], что сопротивление раздавливанию призматических образцов с квадратным основанием уменьшается с увеличением высоты образца и возрастает с увеличением размеров основания при постоянной высоте образца.

Основываясь на вышеупомянутых исследованиях автора, акад. К. Кегель (Фрейбергская горная академия) в работе [30] и ряде последующих статей [31] показал, что эту закономерность можно распространить и на образцы больших размеров. Им были предложены формулы:

для образцов кубической формы

$$K_c = Y_c = c + bd; \quad (3)$$

для образцов квадратного или прямоугольного сечения

$$Y_c = (c + bd) \sqrt{\frac{d}{h}}, \quad (4)$$

где $K_c = Y_c$ — среднее сопротивление раздавливанию образцов кубической или призматической формы, кг/см^2 ;

b — коэффициент, учитывающий свойства материала образца;

c — сопротивление сжатию образца кубической формы с бесконечно малой гранью¹, кг/см^2 ;

d — длина ребра куба или ширина основания призматического образца прямоугольного сечения, см ;

h — высота призматического образца квадратного или прямоугольного сечения, см .

Акад. К. Кегель [30] рекомендует следующие значения параметров b и c : для каменной соли $b = 2,2$; $c = 200 \text{ кг/см}^2$; для карналлита $b = 1,2$; $c = 100 \text{ кг/см}^2$. Для других пород и полезных ископаемых эти параметры подлежат определению опытным путем.

Для определения области применения этих формул акад. К. Кегель [30] предложил испытать образцы кубической формы с размерами граней от 0,1 м до 1 м и более. Формула (3), предложенная

¹ Для кристаллических или зернистых агрегатов понятие бесконечно малой грани лишено физического смысла (Прим. ред.).

акад. К. Кегелем, устанавливает линейную зависимость сопротивления раздавливанию образца кубической формы от размера его грани.

Для определения путем экстраполяции сопротивления раздавливанию кубических и призматических образцов квадратного поперечного сечения автором предложены следующие формулы:

для образцов кубической формы

$$R_c = (r_c + k\sqrt{l}); \quad (5)$$

для призматических образцов квадратного поперечного сечения

$$R_c = (r_c + k\sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}}, \quad \frac{h}{l} < 15, \quad (6)$$

где r_c — сопротивление раздавливанию образца кубической формы с бесконечно малой гранью¹, кг/см²;

k — постоянная, характеризующая свойства материала;

l — длина грани куба или стороны основания образца, см;

h — высота образца призматической формы, см.

В этих формулах соответствующие параметры принимают следующие средние значения: $r_c = 123,5$ кг/см², $k = 59,3$ [47]. Данные относятся к трем сортам румынской каменной соли. Многочисленные образцы брались на 5 действующих рудниках.

Для каждого рудника и для каждого сорта соли параметры r_c и k принимают другие значения.

Так, например, для каменной соли месторождения Слэник (обл. Плоешти) в среднем для трех сортов соли (белой, пестрой и серой) $r_c = 255$ кг/см², $k = 43$. В среднем для трех сортов соли месторождения Окна Мурешулуй $r_c = 174$ кг/см², $k = 49,25$. Для соли месторождения Тыргу Окна средние значения параметров приблизительно такие же, как и для соли месторождения Окна Мурешулуй.

Результаты лабораторных испытаний [47] образцов кубической формы с гранями 5, 10, 15 и 20 см хорошо согласуются с формулой (5).

Формула (6), полученная путем умножения формулы (5) на поправочный коэффициент $\sqrt{\frac{l}{h}}$, также хорошо согласуется с результатами лабораторных испытаний образцов призматической формы [43].

Отметим, что поправочный коэффициент $\sqrt{\frac{l}{h}}$ близок к коэффициентам, предложенным для каменной соли другими авторами (табл. 2).

При применении формул (5) и (6) для других пород или полезных ископаемых параметры r_c и k следует определять из лабораторных испытаний.

Мы присоединяемся к мнению акад. К. Кегеля, что для определения возможности экстраполяции с помощью формул (5) и (6), а также области их применения необходимо испытывать образцы

¹ Практически для r_c автор берет значение кубиковой прочности образца с гранью 4 ÷ 5 см (Прим. ред.).

разных размеров и разной формы. Из каменной соли такие образцы изготовить несложно, учитывая ее однородность и легкость обработки.

Таблица 2

Поправочный коэффициент	$\frac{h}{l}$	1	2	3	4
По Л. Д. Шевякову	1	1	0,8—0,7	0,6—0,5	0,5—0,4
По В. В. Чернявскому	1	1	0,88	0,78	0,72
По Церну	1	1	0,707	0,574	0,5

В настоящее время в Румынии испытание образцов каменной соли больших размеров задерживается из-за отсутствия достаточно мощных прессов. Наиболее мощный пресс, имеющийся в РНР, развивает усилие в 500 т, что позволяет испытать образцы кубической формы с гранью не больше 30—35 см.

До создания мощных прессов, позволяющих испытывать образцы с гранью порядка 1 м, вопрос экстраполяции результатов испытаний небольших (с гранью порядка 20 см) образцов остается открытым, хотя зависимость сопротивления раздавливанию от формы и размеров образцов не оспаривается пока никем.

Так как материал целика неоднороден с точки зрения петрографического состава (в каменной соли, например, имеются включения ангидрида, мергеля, песчаника и т. д.), напластования, наличия видимых или невидимых трещин тектонического или эксплуатационного происхождения, для практических расчетов следует пользоваться не сопротивлением сжатию R_c , определенным экспериментально, а допускаемым напряжением на сжатие, определяемым по формуле:

$$R_{\text{доп}} = \frac{R_c}{n}, \quad (7)$$

где n — коэффициент запаса.

Величина этого коэффициента определяется для каждой породы экспериментально, путем испытания возможно большего количества образцов различной формы.

Ф. Кёглер [34] рекомендует для известняков и песчаников средней крепости (такой же приблизительно, как у каменной соли) принимать $n = 10—20$.

Для каменной соли коэффициенты запаса будут уточнены в соответствии с методами расчета целиков и данными практики во второй части книги.

Вид и величина деформаций опорных целиков

Под действием сжимающей нагрузки опорные целики укорачиваются в вертикальном направлении. Величина деформаций зависит от величины сжимающей нагрузки, физико-механических свойств породы (последняя может быть упругой, упруго-пластической или пластической), формы и размеров целиков.

Определение упругих и пластических характеристик горных пород и полезных ископаемых производится путем лабораторных испытаний, на основании которых строится диаграмма зависимости деформаций материала от приложенных механических усилий.

В соответствии с действующими нормами¹ на сопротивление материалов пределом упругости материала, подвергнутого постепенно возрастающему сжатию, называется сжимающее напряжение (в кг/см^2), которому соответствует относительное укорочение $\epsilon_c = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \leq 0,03\%$ (здесь Δl — укорочение образца при данной нагрузке, l — длина образца).

Пределом малых пластических деформаций называется сжимающее напряжение, при котором относительное укорочение $\epsilon_n = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \leq 0,3\%$.

Опорные целики можно сравнить с образцами больших размеров, деформации которых могут быть определены путем точных маркшейдерских съемок, или теоретически с помощью тех или иных формул.

С точки зрения безопасности и устойчивости опорные целики должны удовлетворять как условиям прочности (напряжения в целике не должны превышать предела прочности сжатия соответствующей породы), так и деформации (деформации должны быть возможно меньшими, желательно упругими и только в крайнем случае малыми пластическими).

Если известны предел упругости и предел малых пластических деформаций, деформации целиков можно измерять с помощью маркшейдерских съемок или же рассчитывать по приводимым ниже формулам.

Для обеспечения безопасности работ деформации должны быть упругими или по крайней мере малыми пластическими. В противном случае неизбежны трещины, вывалы, а иногда и полное разрушение целика.

Приводимая на рис. 4 диаграмма сжатия построена автором [43] на основании испытаний образцов румынской каменной соли.

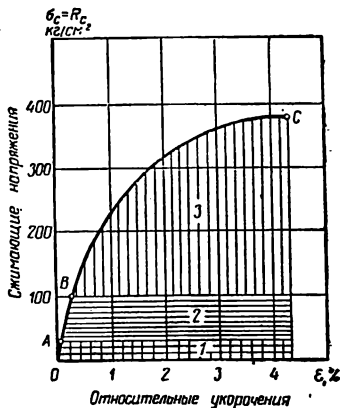


Рис. 4. Диаграмма одноосного сжатия каменной соли (по М. Стаматиу):

ОА — область упругих деформаций 1; АВ — область малых пластических деформаций 2; ВС — область больших пластических деформаций 3

¹ Нормы были установлены Международным съездом по испытанию материалов в Брюсселе в 1906 г.

Эти испытания установили, что предел упругости румынской каменной соли составляет 10—15 кг/см² для белой соли и 20—30 кг/см² для пестрой и серой соли.

В среднем предел упругости румынской каменной соли может быть принят равным 25 кг/см².

Что касается предела малых пластических деформаций, последний зависит от качества соли, колеблясь от 70 до 120 кг/см²; в среднем можно принять 100 кг/см² [43].

Если целик испытывает пластические деформации, приходится учитывать влияние времени. Дело в том, что деформации увеличиваются, несмотря на постоянство нагрузки.

Лабораторные исследования автора [43] показали, что в области пластических деформаций (тем более больших пластических) деформации образцов каменной соли растут со временем.

В таких условиях с увеличением пластических деформаций появляются трещины, затем вывалы и даже полное разрушение целика.

Для определения деформаций целиков в них необходимо укрепить реперы еще до начала выемки. Реперы устанавливают в зависимости от системы разработки (почво- или потолкоуступная) с таким расчетом, чтобы они не были повреждены при очистных работах.

На поверхности имеются другие реперы, служащие основой для измерений. Измерения производятся обычными маркшейдерскими методами.

Точность результатов зависит от степени надежности поверхностных реперов, а также от точности производимых замеров.

В работах [8] и [9] академик Л. Д. Шевяков предложил метод предварительного расчета упругих деформаций опорных целиков.

Метод применим в следующих условиях:

определению подлежат только упругие деформации;

целики сложены из однородного изотропного и упругого материала, подчиняющегося закону Гука;

модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ постоянны;

нагрузки и напряжения распределены равномерно по горизонтальному сечению опорного целика.

В вышеупомянутых работах приведены следующие формулы:

а) целики в виде стен ширины x независимо от длины (см. рис. 10)

$$\Delta l = -\frac{qHl}{E} \left[\frac{A+x}{x} (1-\mu^2) + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1hl}{2E} \mu^2 \cdot \frac{1+\mu}{1-\mu}; \quad (8)$$

б) короткие целики квадратного сечения со стороной x (см. рис. 11)

$$\Delta l = -\frac{qHl}{E} \left[\frac{(A+x)^2}{x^2} + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1hl}{2E} \cdot \frac{2\mu^2}{1-\mu}; \quad (9)$$

в) короткие целики прямоугольного сечения длиной L и шириной x (см. рис. 12)

$$\Delta l = -\frac{qHl}{E} \left[\frac{(A+x)(A+L)}{xL} + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1hl}{2E} \cdot \frac{2\mu^2}{1-\mu}. \quad (10)$$

Случай, представленный на рис. 13,

$$\Delta l = -\frac{qHl}{E} \left[\frac{(A+x)(B+L)}{xL} + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1hl}{2E} \cdot \frac{2\mu^2}{1-\mu}. \quad (11)$$

В этих формулах:

Δl — абсолютное укорочение целика при сжатии (знак минус говорит о том, что имеет место сжатие);

q — объемный вес выележащих пород, кг/см^3 ;

q_1 — объемный вес пород, слагающих целик, кг/см^3 ;

H — глубина от земной поверхности до кровли камер, см ;

l — координата точки опорного целика, в которой определяется деформация;

E — модуль упругости, кг/см^2 ;

A — ширина камеры, расположенной вдоль целика, см ;

B — ширина камеры, расположенной поперек целика, см ;

x — ширина целика, см ;

L — длина целика, см ;

h — высота целика, см ;

μ — коэффициент Пуассона.

Г л а в а II

МЕТОДЫ И ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ И РАСЧЕТА ОПОРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Методы, основанные на гипотезе равномерного распределения напряжений в целике и постоянстве сопротивления раздавливанию

Ниже рассмотрены методы проверки и расчета опорных целиков, предложенные различными авторами.

Рассмотрен также метод проверки размеров целика, предложенный автором на основе нового взгляда на сопротивление целика раздавливанию.

Метод Турнера

Исторически это первый метод расчета целиков, предложенный в 1884 г. [50]. В работе приведены формулы для проверочного расчета размеров целиков, оставляемых при подземной добыче строительных материалов.

Турнер исходит из положения, что опорные целики несут нагрузку от веса покрывающей толщи пород, предполагая, что выше-

лежащая толща не связана с окружающими породами¹ или же составляет одно целое с ними.

Обозначим (рис. 5):

$S = L \cdot l$ — суммарная площадь разработки, m^2 ;

L — длина (ширина принята равной единице), m ;

H — глубина разработки, m ;

$\frac{S}{k} = s$ — суммарная площадь опорных целиков в горизонтальном сечении, m^2 ;

$k = \frac{S}{s}$ — коэффициент, равный отношению площади разработки к площади, занимаемой целиками;

φ — сопротивление раздавливанию слагающих целики пород, определенное лабораторными испытаниями образцов кубической формы, t/m^2 ;

δ — средний объемный вес пород кровли, t/m^3 ;

$P = 2(L + l)$ — периметр разрабатываемой площади;

F — сопротивление пород кровли срезу, t/m^2 .

В упомянутых выше предпосылках Турнер вывел формулы:

а) при разработке на небольших глубинах $\left(\text{большое } \frac{S}{H}\right)$

$$\varphi \frac{S}{k} \geq S \delta H \quad \text{или} \quad \frac{\varphi}{k} \geq \delta H; \quad (12)$$

б) при разработке на больших глубинах $\left(\text{небольшое } \frac{S}{H}\right)$

$$\varphi \frac{S}{k} + FPH \geq S \delta H \quad \text{или} \quad \frac{\varphi}{k} \geq \delta H - \frac{FPH}{S}. \quad (13)$$

¹ До тех пор, пока деформации целиков не выходят за пределы пропорциональности, гипотеза о давлении веса всего породного столба практически вполне приемлема. Следует заметить, что методы Турнера, Ля Гупиера, Грюнера, Л. Д. Шевякова и М. Стаматиу, основанные на упомянутой гипотезе, отличаются между собой только способом оценки прочности целика. В одних — это кубиковая прочность, деленная на коэффициент запаса, в других — призматическая прочность, взятая также с каким-то запасом. Отличия такого рода крайне не существенны, так как во всех этих методах целик рассматривается как находящийся в условиях одноосного сжатия с равномерно распределенной по торцам (контактам с кровлей и почвой) нагрузкой. При этом не учитывается его сцепление с окружающим массивом, которое может быть совершенно различным, не учитывается наличие тонких, а иногда и достаточно мощных прослоек материала с другими механическими свойствами. Поэтому все эти методы эквивалентны с точки зрения близости расчетной схемы к действительности, а отличия между ними чисто формальные: достаточно в соответствующей формуле Турнера вместо кубиковой прочности взять призматическую и получится после элементарных преобразований формула Л. Д. Шевякова. Поэтому глава III книги, названная автором «Проверка на практике расчетных и проверочных формул, предложенных различными авторами», в части методов Турнера, Ля Гупиера, Грюнера и Л. Д. Шевякова иллюстрирует по существу не различие в методах, а различие в результатах расчетов в зависимости от того, какие рекомендуются коэффициенты запаса и как вводится поправка на геометрическую форму целика (*Прим. ред.*)

Важнейшие недостатки этих проверочных формул заключаются в следующем:

- 1) нет указаний на то, при каких $\frac{S}{H}$ предпочесть ту или другую формулу;
- 2) в формулы входит сопротивление раздавливанию без всяких коэффициентов запаса; предполагается, что это сопротивление постоянно и не зависит от формы и размеров целиков;
- 3) формулы могут служить лишь для проверки прочности целиков, размерами которых следует задаться;
- 4) не учтен собственный вес целиков.

Гипотеза Турнера отражает действительность с достаточной для практики горного дела точностью, поэтому она легла в основу нескольких методов расчета целиков¹.

Действительно, при современном уровне знаний о распределении напряжений в целиках и влияющих на него факторах гипотеза вполне приемлема. При равномерном распределении напряжений в горизонтальном сечении и заведомом завышении расчетной нагрузки можно не сомневаться, что размеры целиков окажутся достаточными, если, конечно, сопротивление породы раздавливанию и коэффициент запаса определены правильно.

Акад. Л. Д. Шевяков считает гипотезу Турнера вполне приемлемой, по крайней мере для целиков, расположенных в середине разрабатываемого поля. Вот как он обосновывает это утверждение [8]: «Обстановка катастрофы на соляном руднике Варанжевилль (Франция) и наличие мульды оседания, констатированной на калийном руднике (Соликамск) наблюдениями 1940 г., дают основания думать, что максимальное давление на расположенные в средней части вы-

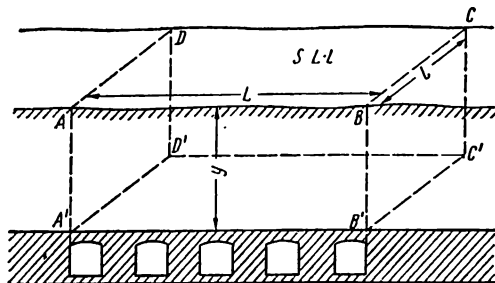


Рис. 5. Схема пластового месторождения, разрабатываемого камерно-столбовой системой с указанием необходимых для расчета размеров (по гипотезе Турнера)

¹ М. Статину неоднократно подчеркивает, что в основе ряда теорий расчета целиков лежит предположение, что нагрузка на целики создается всем весом породного столба. Это предположение при обычных условиях достаточно хорошо выполняется, если камер более трех, а целики не имеют значительных пластических деформаций или им не придана искусственно дополнительная податливость. В последних двух случаях, даже при большом числе целиков, нагрузку на них необходимо определять расчетом, так как она уже не будет равна весу столба породы и будет зависеть от деформации целиков, глубины разработки и деформационных характеристик пород кровли и целиков (Прим. ред.).

работанных пространств опорные целики может наступить при отношении $\frac{H}{A'B'}$, равном лишь 2—3. Конечно, это отношение должно зависеть и от характера покрывающих месторождение пород. Надо думать, что чем слабее породы, тем при меньшей величине $\frac{H}{A'B'}$, наступает их максимальное давление на опорные целики».

Так как на данном руднике желательно иметь целики одинаковых размеров, можно заключить, что с точки зрения безопасности работ их следует рассчитывать на максимальную возможную нагрузку, т. е. полагая их расположенными в средней части площади разработок.

Метод Г. де ля Гупиера

В своем классическом курсе горного дела [26] Г. де ля Гупиер предложил ряд формул для проверки и расчета целиков, исходя из того, что нагрузка складывается из веса вышележащей толщи пород и собственного веса целиков.

Случай разработки на небольших глубинах (порядка 100 м).

а) Система разработки с короткими (изолированными) столбами (рис. 6).

Обозначим:

p — ширина опорного целика, м;

p' — длина опорного целика, м;

g и g' — ширина камер, м;

H — средняя глубина от поверхности до кровли камер, м;

h — высота камер и опорных целиков, м;

Δ — средний объемный вес вышележащих пород, кг/м³;

R — сопротивление материала целика сжатию, определенное испытанием образцов кубической формы, кг/см²;

δ — объемный вес пород, слагающих целик, кг/м³;

n — коэффициент запаса, равный для горных пород 1,5—2 в соответствии с французскими нормами.

Тогда условие прочности целика запишется в виде

$$(p + g)(p' + g')H\Delta + pp'h\delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} pp'. \quad (14)$$

Для использования формулы следует задаться шириной g и g' камер и одним из размеров p и p' целика, или же их отношением $\frac{p'}{p} = k$. Наименьшим значением k определяется минимальное значение неизвестного размера целика.

При квадратных целиках $p = p'$, $g = g'$ и

$$\frac{p}{g} = \alpha$$

формула (14) принимает вид

$$\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \leq \frac{10\,000 R}{nH\Delta}, \text{ откуда } \alpha \geq \frac{1}{\sqrt{\frac{10\,000 R}{nH\Delta} - 1}}. \quad (15)$$

б) Система разработки с целиками в виде «стен» (рис. 7).

Условие прочности единицы длины целика выражается формулой:

$$(p + g) H \Delta + p h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} p. \quad (16)$$

Если пренебречь собственным весом целиков и обозначить

$$\frac{p}{g} = \alpha,$$

эта формула упрощается:

$$1 + \frac{1}{\alpha} \leq \frac{10\,000 R}{n H \Delta},$$

откуда

$$\alpha \geq \frac{n H \Delta}{10\,000 R - n H \Delta}. \quad (17)$$

в) Система разработки с продольными и поперечными целиками (рис. 8).

Условие прочности записывается в виде

$$(p + c)(p' + c') H \Delta + (pc' + p'c + pp') h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} (pc' + p'c + pp'). \quad (18)$$

Здесь c и c' — длина и ширина камер, p и p' — ширина опорных целиков, прочие обозначения прежние.

Случай разработки на больших глубинах.

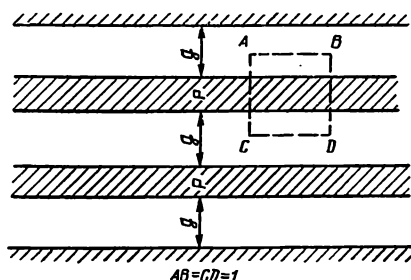


Рис. 7. К расчету целиков в виде «стен» (по Г. де Ля Гупиеру)

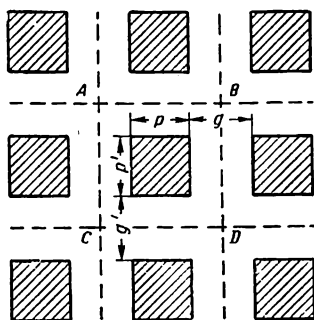


Рис. 6. Схематический горизонтальный разрез по месторождению, разрабатываемому камерно-столбовой системой (по Г. де Ля Гупиеру)

Хотя в своем курсе Гатон де Ля Гупиер не уточняет понятия «большая глубина», будем считать, что изложенный ниже метод применим для глубин, намного превышающих 100 м.

По мнению автора [26], «в случае применения на большой глубине камерно-столбовой системы с короткими столбами следует отказаться от попыток определить аналитически отношение между шириной камеры

и шириной целика; это отношение должно назначаться по данным практики, причем так, чтобы обеспечить безопасность подземных работ».

Для прочих вариантов камерно-столбовой системы на больших глубинах автор не дает никаких рекомендаций по расчету целиков. Можно, однако, предположить, что и в отношении этих вариантов он ориентируется на данные практики.

Основной недостаток метода Г. де Ля Гупиера, приводящий к несоответствию данных расчета и практики, заключается в рекомендации автора определять предел прочности породы целика путем испытания кубических образцов обычных размеров (5—20 см) и принимать коэффициент запаса $n = 1,5—2$.

Современные же исследования показали, что прочность при сжатии R_c образцов различных пород и полезных ископаемых не является постоянной величиной, а зависит от формы и размеров образцов. Точно так же фигурирующий в приведенных выше выражениях коэффициент запаса n не может быть принят одним и тем же для всех пород и полезных ископаемых.

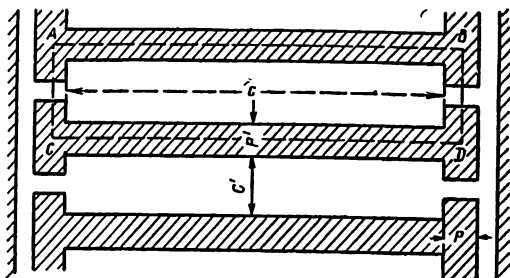


Рис. 8. К расчету продольных и поперечных ϵ целиков (по Г. де Ля Гупиеру)

Как будет показано на примерах во второй части книги, коэффициент запаса n зависит от свойств горной породы и принятого метода расчета, значительно превышая 1,5—2 для каменной соли.

Метод М. Грюнера

Подобно предыдущим методам расчета, метод Грюнера основан на допущении, что на целик помимо его собственного веса давит вышележащая толща горных пород, простирающаяся до поверхности земли [25].

При разработке месторождений, залегающих на небольшой глубине, камерно-столбовой системой с короткими (изолированными) столбами проверка размеров целиков рекомендуется производить по формуле

$$SP + sp \leq R_s \quad (19)$$

или, если пренебречь собственным весом ($sp = 0$) столба,

$$\frac{s}{S} \geq \frac{P}{R} = \frac{\gamma H}{R}, \quad (20)$$

где

s — площадь горизонтального сечения целика, m^2 ;

S — площадь, опирающаяся на один целик, m^2 ;

$P = \gamma H$ — давление вышележащей толщи пород на целик, t/m^2 , (здесь γ — объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ; H — средняя мощность вышележащей толщи от кровли камер до дневной поверхности, m);

$p = \gamma' h$ — давление, вызванное собственным весом столба (здесь γ' — объемный вес материала целика, t/m^3 ; h — высота целика, m);

R — сопротивление породы целика сжатию, определяемое путем испытания образцов кубической формы, t/m^2 .

Этот же метод по мнению автора применим и в случае камерно-столбовой системы с длинными (сплошными) столбами.

Относительно коротких (изолированных) или же длинных (сплошных) целиков при разработке на больших глубинах Грюнер считает, что «... их размеры могут быть назначены лишь на основании данных практики».

Что же касается продольных и поперечных целиков Грюнер [25]* указывает, что «... при определении их размеров опираются больше на данные практики нежели на расчеты». Недостатком метода является предположение, что прочность R данной горной породы постоянна, а также отсутствие в предложенных формулах коэффициента запаса.

Метод Л. Д. Шевякова

В опубликованной в 1941 г. работе [8] акад. Л. Д. Шевяков подробно рассмотрел вопросы определения размеров целиков и предложил ряд формул для целиков различной формы.

Эти формулы основаны на следующих гипотезах:

а) наибольшая возможная нагрузка на опорные столбы создается весом всей толщи горных пород до земной поверхности;

б) вертикальные напряжения в горизонтальных сечениях целиков считаются распределенными равномерно, в предположении, что фактическая неравномерность покрывается вводимым в расчет запасом прочности;

в) в расчеты вводятся полученные лабораторными испытаниями величины сопротивления горных пород целиков сжатию с поправками на форму целиков.

г) игнорируется некоторое возрастание прочности при увеличении абсолютных размеров образцов, повышение прочности при сжатии массивов, высота которых меньше размеров их основания, а также повышение прочности материала при двухосном сжатии сравнительно с одноосным, что вносит в дальнейшие расчеты для соответствующих случаев некоторый запас прочности.

* Стр. 74, § 4, пункт 57.

Исходя из приведенных выше гипотез, акад. Л. Д. Шевяков вывел общее условие для расчета прочных размеров целика (рис. 9)

$$SHq + shq_1 \leq s \frac{R}{n}, \quad (21)$$

откуда, для предельного случая

$$\frac{S}{s} = \frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq}. \quad (22)$$

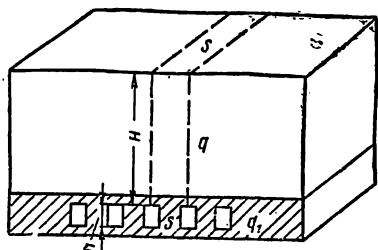


Рис. 9. Схематический разрез по пластовому месторождению, разрабатываемому камерно-столбовой системой (по Л. Д. Шевякову)

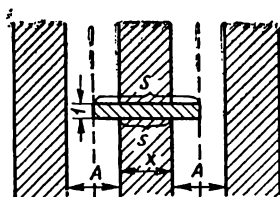


Рис. 10. К расчету целиков в виде «стен» (по Л. Д. Шевякову)

В этих и последующих формулах введены следующие обозначения:

H — глубина верхней части опорного целика от земной поверхности, m ;

h — высота опорного целика, m ;

s — площадь горизонтального сечения опорного целика, m^2 ;

S — площадь горизонтального сечения горных пород, приходящаяся на один целик, m^2 ;

A и B — ширина камер, ограничивающих целики, m ;

x — ширина опорного целика, m ;

q — средний объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ;

q_1 — средний объемный вес породы опорного целика, t/m^3 ;

R — сопротивление породы опорного целика сжатию, определяемое лабораторными испытаниями кубических (5—20 см) образцов, t/m^2 ;

n — коэффициент запаса прочности ($n = 1,5—2$ по французским нормативам для подземных разработок камня и $n = 2—3$ для каменной соли и калийных солей).

На основе общей зависимости были установлены формулы для определения ширины опорного целика:

а) Целики в виде «стен» (рис. 10).

Относя расчет к единице длины, получим

$$\frac{S}{s} = \frac{A + x}{x},$$

откуда

$$x = \frac{A}{\frac{S}{s} - 1}, \quad (23)$$

или, с учетом формулы (22)

$$x = \frac{A}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - 1} \quad (24)$$

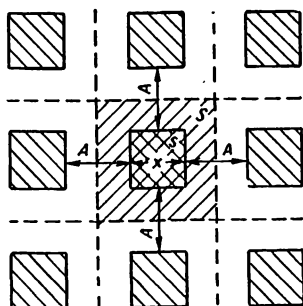


Рис. 11. К расчету коротких столбов квадратного сечения (по Л. Д. Шевякову)

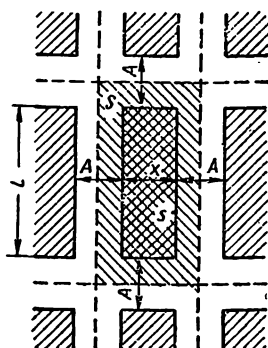


Рис. 12. К расчету коротких столбов прямоугольного сечения (по Л. Д. Шевякову)

б) Целики квадратные (рис. 11)

$$\frac{S}{s} = \frac{(A+x)^2}{x^2},$$

откуда

$$x = \frac{A}{\sqrt{\frac{S}{s} - 1}}$$

или, с учетом формулы (22),*

$$x = \frac{A}{\sqrt{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - 1}}. \quad (25)$$

в) Прямоугольные целики длины L (рис. 12)

$$\frac{S}{s} = \frac{(A+x)(A+L)}{xL},$$

* При выводе формулы (25) Л. Д. Шевяковым получающееся квадратное уравнение решено неверно, формула должна иметь вид $x = \frac{A}{\sqrt{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - 1}}.$

откуда

$$x = \frac{\frac{A^2}{L} + A}{\frac{S}{s} - \frac{A}{L} - 1}$$

или, с учетом формулы (23),

$$x = \frac{\frac{A^2}{L} + A}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - \frac{A}{L} - 1}. \quad (26)$$

При $\frac{x}{L} = c$

$$\frac{S}{s} = \frac{(A+x) \left(A + \frac{x}{c}\right)}{\frac{x^2}{c}}.$$

Откуда

$$x = \frac{2Ac}{-c-1 \pm \sqrt{(c-1)^2 + 4c \frac{S}{s}}},$$

или, с учетом формулы (22)

$$x = \frac{2Ac}{-c-1 \pm \sqrt{(c-1)^2 + 4c \left(\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq}\right)}}. \quad (27)$$

г) Короткие целики прямоугольного сечения, ограниченные ка-
мерами неодинаковой ширины (рис. 13):

$$\frac{S}{s} = \frac{(A+x)(B+L)}{xL} \quad \text{и} \quad x = \frac{A + \frac{AB}{L}}{\frac{S}{s} - \frac{B}{L} - 1},$$

или, с учетом формулы (22)

$$x = \frac{A + \frac{AB}{L}}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - \frac{B}{L} - 1}. \quad (28)$$

Как указывалось выше, метод акад. Л. Д. Шевякова подобно
предыдущим методам основан на гипотезе Турнера.

Что касается входящего в формулы предела прочности породы
целика сжатию, последний считается постоянным для данной поро-
ды и определяется лабораторными испытаниями обычных образцов
кубической (5—20 см) формы и корректируется коэффициентом
запаса n .

Приведенные выше формулы дают возможность непосредственно
определить ширину целика, а не проверять заранее заданные его
размеры, чем выгодно отличаются от формул Турнера, Г. де Ля Гу-
пиера и Грюнера. Их недостаток — допущение постоянства

сопротивления целика сжатию и формальное введение коэффициента запаса n , что приводит к расхождению данных расчета и практики.

Так, например, если принять значения R и n , рекомендуемые автором, ширина целиков получается меньше необходимой для обеспечения безопасности работ.

Как будет показано на примерах во второй части книги, эти формулы могут применяться успешно лишь при тщательном выборе величин R и n , основанном на возможно большем количестве наблюдений.

В работе [4] К. В. Руппенейт, основываясь на ряде аналитических расчетов, утверждает: «При большом количестве целиков метод акад. Л. Д. Шевякова дает результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных более точными методами, и вполне пригоден для практических расчетов».

И там же: «Замеры напряжений в опорных целиках, выполненные в 1940 г. на соляных рудниках Артемовска, подтвердили правильность расчетной схемы, предложенной акад. Л. Д. Шевяковым».

Поэтому метод акад. Л. Д. Шевякова применим для практических расчетов опорных целиков соляных и других рудников при большой мощности залежи».

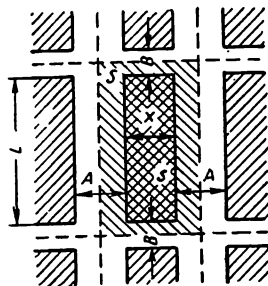


Рис. 13. К расчету коротких столбов прямоугольного сечения, ограниченных камерами неодинаковой ширины (по Л. Д. Шевякову)

Методы расчета, основанные на гипотезе равномерного распределения напряжений в целиках и зависимости сопротивления сжатию от формы и размеров целиков

Метод К. Кегеля

Основываясь на гипотезе Турнера о нагрузке на целики, равной весу пород, покрывающих площадь разработок, акад. К. Кегель в работе [28], опубликованной в 1906 г., предложил формулу, учитывающую угол падения залежи,

$$\gamma = \frac{hsp \cos \alpha}{10 K_d}, \quad (29)$$

где γ — отношение суммарной горизонтальной площади целиков к площади разработок;

h — мощность вышележащей толщи пород, m ;

sp — средний объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ;

α — угол падения залежи в градусах;

K_d — сопротивление целика сжатию, $кг/см^2$.

Применив эту формулу к разработкам на глубине $h = 500$ м, характеризуемым $K_d = 200$ кг/см², $sp = 2,7$ т/м³ и $\alpha = 0^\circ$, акад. К. Кегель нашел

$$\gamma = \frac{500 \cdot 2,7 \cdot 1}{10 \cdot 200} = 0,675, \text{ или } 67,5\%.$$

В дальнейшем практика разработок каменной соли на глубине 500 м показала, что γ может быть значительно меньше 0,675 (около 0,35) при вполне хорошем состоянии целиков и обеспечении надлежащей безопасности работ.

Акад. К. Кегель [30] объясняет это противоречие не ошибочно-стью формулы (29), а тем обстоятельством, что сопротивление сжатию, определяемое лабораторными испытаниями относительно небольших (10—20 см) образцов кубической формы, не равно сопротивлению породы целика, зависящему от формы и размеров последнего.

Основываясь на ряде испытаний румынской каменной соли, проведенных М. Стаматиу [43] с образцами кубической и призматической формы разных размеров, акад. К. Кегель пришел к заключению, что сопротивление сжатию каменной соли, и вообще любой горной породы, не есть постоянная величина, а зависит от формы и размеров образцов (столбов).

Выше приведена формула (4) К. Кегеля для определения сопротивления сжатию горной породы опорного целика

$$K_d = (c + bd) \sqrt{\frac{d}{h}}.$$

С учетом этой зависимости акад. К. Кегель предложил вместо формулы (29) следующую общую формулу для проверки размеров целиков:

$$\gamma = \frac{tspM \cos \alpha}{10(c + bd) \sqrt{\frac{d}{h}}}, \quad (30)$$

где t — коэффициент запаса больший единицы;

M — мощность вышележащей толщи пород, м;

Прочие обозначения прежние.

В вышеупомянутой работе [30] автор оговаривает, что выполнение условия (30) недостаточно. Помимо этого должно быть соблюдено условие прочности породы целика, т. е.

$$K_d > D = \frac{Msp \cos \alpha}{10 \gamma}, \quad (31)$$

где K_d — сопротивление сжатию, определенное по формуле (4), кг/см²;

D — сжимающее напряжение в опорном целике, кг/см²;

Прочие обозначения прежние.

По сравнению с ранее рассмотренными метод акад. К. Кегеля обладает тем преимуществом, что учитывает зависимость сопро-

тивления породы от формы и размеров целика, а также угол падения залежи.

Однако, как будет показано на примерах в части второй настоящей работы, из-за слишком больших значений прочности, получаемых по формуле (4), при рекомендованном Кегелем коэффициенте запаса $t = 1,5$ размеры целиков каменной соли получаются заниженными.

В более поздней работе [32] акад. К. Кегель предложил для определения размеров стороны целиков квадратного сечения следующую формулу:

$$x = \frac{\sqrt{v}}{1 - \sqrt{v}} k, \quad (32)$$

где x — сторона квадрата основания целика;

v — коэффициент эксплуатационных потерь, выраженный в виде десятичной дроби (например, 0,4—0,6);

k — ширина камер, ограничивающих целик.

График функции $\frac{\sqrt{v}}{1 - \sqrt{v}}$ при $v = 0,4 - 0,6$ представлен на рис. 14. Если целики квадратного сечения и одинаковых размеров, коэффициент эксплуатационных потерь зависит от размера стороны квадрата и от ширины камер.

При $v = 0,5$, т. е. 50% эксплуатационных потерь, что обычно имеет место на соляных разработках, и камерах шириной $k = 20$ м получим $x = 2,42 \cdot 20 = 48,4$ м.

Применение последней формулы акад. К. Кегеля ограничивается целиками квадратного сечения.

Метод М. Стаматиду

Метод основан на гипотезе Турнера; напряжения в целиках не должны превышать прочности породы целика; нагрузка складывается из веса вышележащей толщи пород, веса потолочины и собственного веса целика (рис. 15).

Эта гипотеза тем ближе к действительности, чем меньше (т. е. ближе к 1) отношение глубины разработок H к ширине площади разработок L (по данным акад. Л. Д. Шевякова на калийных рудниках Соликамска это отношение равно 2—3).

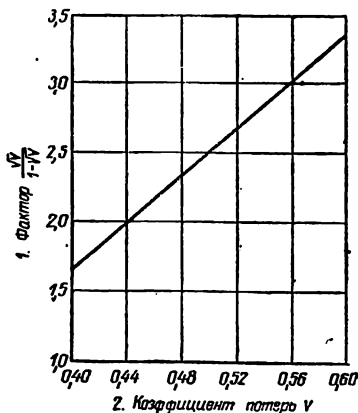
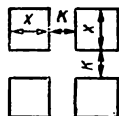


Рис. 14. График зависимости $\frac{\sqrt{v}}{1 - \sqrt{v}}$ при $v = 0,4 - 0,6$ (по К. Кегелю)

Обозначим:

- s — суммарная площадь целиков, m^2 , $s = ms_1$;
 S — площадь разработок, m^2 ;
 s_1 — площадь горизонтального сечения одного целика, m^2 ;
 m — количество одинаковых по форме и размерам целиков;
 H — глубина разработок, m ;
 γ — средний объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ;
 γ_1 — средний объемный вес породы целиков, t/m^3 ;
 e — средняя толщина потолочины, m ;
 h — высота столбов, m ;
 R_c — прочность породы целиков при сжатии, определяемая по формуле (6) t/m^2 ;
 n — коэффициент запаса, назначаемый по данным практики.

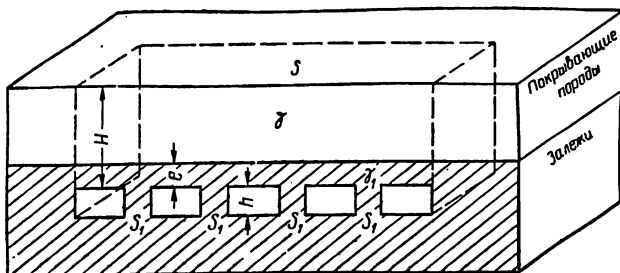


Рис. 15. Схематический вертикальный разрез по залежи с указанием необходимых для расчета размеров (по М. Стаматиу)

Условие прочности записывается в виде:

$$S\gamma(H-e) + S\gamma_1e + s\gamma_1h \leq sR_c \quad (33)$$

или

$$\frac{s}{S} \geq \frac{\gamma(H-e) + \gamma_1e}{R_c - \gamma_1h} = \frac{\gamma H + e(\gamma_1 - \gamma)}{R_c - \gamma_1h}. \quad (34)$$

Так как обычно $\gamma_1 \cong \gamma$, а величина γ_1h мала по сравнению с R_c , формула (34) упрощается:

$$\frac{s}{S} \geq \frac{\gamma H}{R_c - \gamma h} \quad (35)$$

или

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma h}, \quad \text{где } \frac{R_c}{n} = R_{c. \text{ доп}} \quad (36)$$

и

$$\frac{s}{S} \geq \frac{\gamma H}{\bar{R}_c}. \quad (37)$$

Для целиков в форме призм с квадратным основанием, рассчитываемых по формулам (34)—(37), прочность на сжатие R_c определяется из формулы (6)

$$R_c = (r_c + k\sqrt{l})\sqrt{\frac{l}{h}},$$

как было предложено автором в сообщении Румынской Академии наук в 1951 г. [47].

Для призматических целиков с прямоугольным основанием закон зависимости прочности на сжатие от размеров основания и высоты пока не известен. Мы наметили серию опытов для выяснения этого вопроса. Так как порода целика не однородна с точки зрения структуры, текстуры, физико-механических свойств и, кроме того, необходимо учитывать наличие трещин (видимых или невидимых, тектонического или эксплуатационного происхождения), для практических расчетов следует применять формулу (36) или же зависимость

$$\frac{s}{S} \geq \frac{\gamma H}{R_{c. \text{ доп}}} = \frac{\gamma H}{\frac{R_c}{n}} = \frac{n \gamma H}{R_c}. \quad (38)$$

Если зависимость (34)

$$\frac{\gamma H + e(\gamma_1 - \gamma)}{R_c - \gamma_1 h} = 1, \quad (39)$$

то $\frac{s}{S} = 1$, или $s = S$, т. е. площадь целиков равна площади разработок; следовательно, разработка данного месторождения камерно-столбовой системой теоретически невозможна.

Из формулы (39)

$$\frac{\gamma H + e(\gamma_1 - \gamma)}{R_c - \gamma_1 h} = 1$$

можно определить максимальную глубину, на которой мыслится разработка камерно-столбовой системой (с точки зрения теории и практики):

$$H_m (\text{теоретическая}) = \frac{R_c + \gamma e - \gamma_1 (h + e)}{\gamma}; \quad (40)$$

$$H_m (\text{практическая}) = \frac{\frac{R_c}{n} + \gamma e - \gamma_1 (h + e)}{\gamma}. \quad (41)$$

Эти выражения можно упростить, принимая во внимание, что $\gamma \cong \gamma_1$

$$H_m (\text{теоретическая}) = \frac{R_c}{\gamma} - h \quad (42)$$

и

$$H_m (\text{теоретическая}) = \frac{R_c}{\gamma}; \quad (43)$$

аналогічно

$$H_m (\text{практическая}) = \frac{R_c}{n\gamma} - h; \quad (44)$$

$$H_m (\text{практическая}) = \frac{R_c}{n\gamma}. \quad (45)$$

Изложенный выше метод не позволяет определить непосредственно прочные размеры целиков; он пригоден лишь для проверки заранее заданных размеров.

Зависимость, при помощи которой осуществляется проверка, учитывает следующие факторы, определяющие прочные размеры

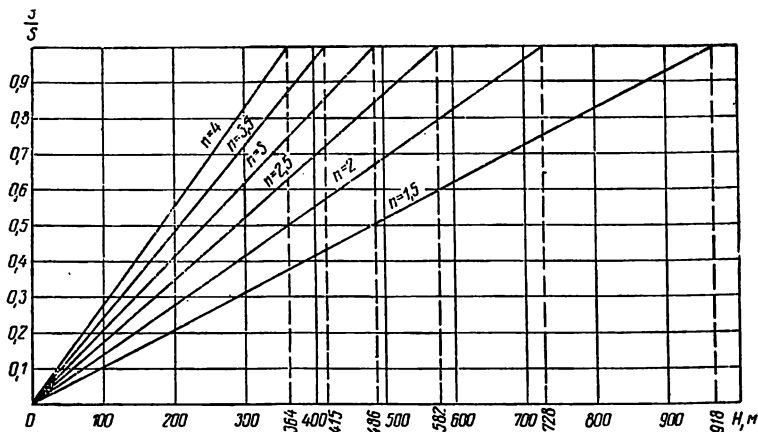


Рис. 16. Номограмма для определения отношения $\frac{s}{S}$ в зависимости от глубины разработок H и коэффициента запаса n для каменной соли.

Примечание: $n = 4$ — разработка нисходящим забоем при камерах трапециевидного сечения; $n = 4 \div 1,5$ — разработка восходящим забоем при камерах прямоугольного сечения

целиков: глубину разработок, средний объемный вес покрывающих пород и полезного ископаемого, ширину ограничивающих целики камер (входит в S), прочность породы целика на сжатие в зависимости от его формы и размеров и, наконец, соответствующий данному полезному ископаемому коэффициент запаса.

Степень точности расчетов по формулам (36) и (38) определяется правильностью выбора величин R_c и n — первой по формуле (6), второй по данным практики.

Проверка формул будет проведена на примерах во второй части книги.

Так как для данной горной породы отношение $\frac{\gamma}{R_{c \text{ доп}}} = C = \text{const}$,

Примечание: $n = 4$ — разработка нисходящим забоем при камерах трапециевидного сечения $n = 4 \div 1,5$ — разработка восходящим забоем при камерах прямоугольного сечения

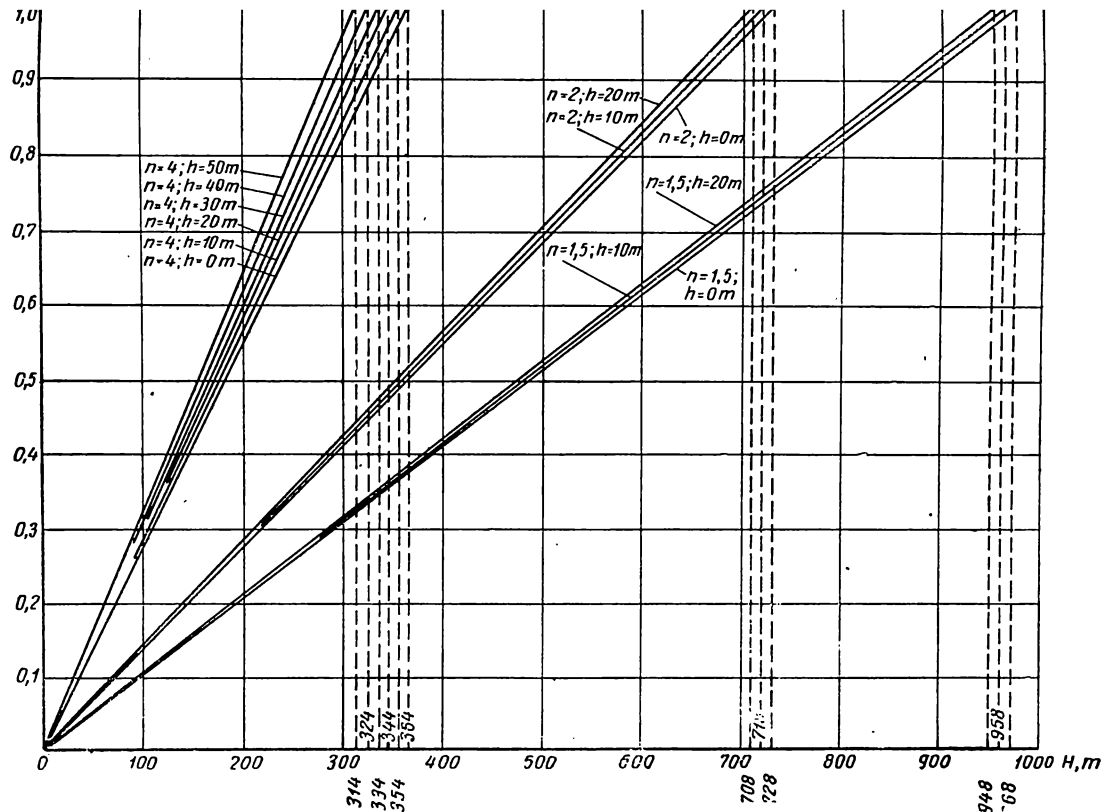


Рис. 17. Номограмма для определения отношения $\frac{s}{lc}$ в зависимости от глубины разработок H и коэффициента запаса n для каменной соли

выражения (36) и (38) для предельного случая можно привести к виду:

$$\frac{s}{S} = \frac{H}{\frac{1}{C} - h}; \quad (36 \text{ бис})$$

$$\frac{s}{S} = CH. \quad (38 \text{ бис})$$

Номограмма для определения отношения $\frac{s}{S}$ в зависимости от глубины разработок H и в соответствии с (38-бис) при $n = 1,5 - 4$ и $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$ (каменная соль) приведена на рис. 16*.

Номограмма для определения отношения $\frac{s}{S}$ в зависимости от глубины разработок H и в соответствии с (36-бис) при $n = 1,5 - 4$, высоте столбов $h = 0 - 50 \text{ м}$ и $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$ (каменная соль) приведена на рис. 17**.

Подобные номограммы можно построить и для других полезных ископаемых для значений прочности на сжатие R_c , определяемых как лабораторными испытаниями, так и путем экстраполирования по формуле (6).

Методы расчета, основанные на гипотезах неравномерного распределения напряжений в целиках, и параболы давления¹

Метод М. М. Протоद्याконова

Расчетная гипотеза М. М. Протоद्याконова принципиально отличается от гипотез, лежащих в основе изложенных до сих пор методов. «Имеем две подземные выработки, над которыми образуются разгружающие грунтовые своды (рис. 18). Подземная конструкция воспринимает вес грунта, расположенного ниже этого свода, а вся остальная порода над выработкой (заштрихована) передает свой вес на целик»².

Для определения ширины целика T рассчитывают предварительно ширину s , на которой распределяется нагрузка от веса толщи горных пород, заключенной между образующимися над вы-

* На рис. 16 отношение $\frac{\gamma}{R_{c. \text{доп}}}$ обозначено $\frac{\gamma_a}{R_a}$.

** На рис. 17 отношение $\frac{R_{c. \text{доп}}}{\gamma}$ обозначено $\frac{R_a}{\gamma_a}$.

¹ Основным недостатком этого раздела, с нашей точки зрения, является то, что при описании теорий, предложенных различными авторами, М. Статину совершенно не анализирует правильности предпосылок, положенных в основу того или иного вывода или формулы. (Прим. ред).

² Цитировано по [2], стр. 60. (Примеч. переводчика).

работками сводами обрушения и земной поверхностью из уравнения равновесия

$$Na\gamma_0 - \left[h'a\gamma_0 + \frac{2}{3}(h_1 - h')a\gamma_0 \right] - \frac{1}{2}nS = 0, \quad (46)$$

где γ_0 — средний объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ;

Прочие обозначения указаны на рис. 18.

Если пренебречь величиной, заключенной в квадратные скобки, и принять в соответствии с данными практики $\frac{n}{s} = 0,0795f$,

где $f = \frac{R_c}{100}$ — коэффициент крепости породы по М. М. Протодяконову, а R_c — сопротивление породы сжатию, получим

$$s = 5,2 \sqrt{\frac{\gamma_0 a H}{f}}. \quad (47)$$

Расчетная формула для определения ширины столба, установленная на основании зависимости (46) при коэффициенте запаса, равном 2, будет

$$T \geq 20 \sqrt{\frac{\gamma_0 a H}{f}} \quad (48)$$

(входящие в формулы величины выражены в кг и соответственно в см)

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma_0 a H}{f}} \quad (48 \text{ бис})$$

(входящие в формулы величины выражены в т и соответственно в м).

Предложенная М. М. Протодяконовым формула учитывает следующие факторы: средний объемный вес вышележащих пород, ширину ограничивающих целик камер, глубину разработок и прочность породы целика на сжатие (входит в коэффициент крепости

$f = \frac{R_c}{100}$), определяемую лабораторными испытаниями образцов кубической формы. Однако в формулу не входит высота столбов, от которой, как было показано выше, в значительной мере зависит прочность породы целика на сжатие.

Как явствует из приводимого ниже примера, рассматривающего камеры прямоугольного сечения обычно принятой ширины $2a = 20 \text{ м}$ в каменной соли, для которой $\gamma_0 = 2,2 \text{ т/м}^3$ и $f = \frac{300}{100} = 3$, формула

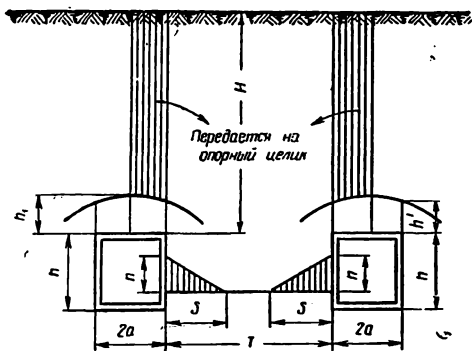


Рис. 18. К расчету целика между двумя горными выработками (по М. М. Протодяконову)

М. М. Протодяконова дает завышенную ширину целиков. Имеем:

$$H = 100 \text{ м}, \quad T \geq 17,55 \text{ м};$$

$$H = 200 \text{ м}, \quad T \geq 24,74 \text{ м};$$

$$H = 300 \text{ м}, \quad T \geq 30,36 \text{ м};$$

$$H = 400 \text{ м}, \quad T \geq 35,10 \text{ м};$$

$$H = 500 \text{ м}, \quad T \geq 39,24 \text{ м};$$

$$H = 600 \text{ м}, \quad T \geq 43,00 \text{ м};$$

$$H = 700 \text{ м}, \quad T \geq 46,43 \text{ м}.$$

В практике же разработок каменной соли на этих глубинах в ГДР и РНР, характеризуемой одинаковой шириной камер и такими же значениями γ_0 и f , ширина целиков в зависимости от глубины составляет 8—20 м [23] и [39].

Поэтому формула М. М. Протодяконова может быть применена для практических расчетов только после известной корректировки.

Для глубин, не превышающих 150 м, формула (48 бис) может применяться в предложенном автором виде ($K = 0,65$).

Для больших глубин значения K в этой формуле должны устанавливаться по данным практики.

Метод С. С. Давыдова

Для определения ширины целика между двумя выработками С. С. Давыдовым [2] рекомендуются формулы:

а) Для выработок одинаковой ширины

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma a H}{f}}, \quad (49)$$

где γ — средний объемный вес вышележащих пород, т/м^3 ;

a — полуширина выработки, м ;

H — глубина от земной поверхности до кровли выработок, м ;

f — коэффициент крепости породы по М. М. Протодяконову.

Приведенная формула идентична с формулой М. М. Протодяконова.

б) Для выработок разной ширины.

Применяется приведенная выше формула; величина a определяется из выражения

$$\sqrt{a} = \frac{1}{2} (\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}). \quad (50)$$

Кроме того, следует проверить, не превышают ли напряжения в целике допускаемых по формулам:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + m_2 \sigma_2 \left(1 - \frac{T}{S_2} \right) \leq [\sigma = R_2^*], \quad (51)$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 + m_1 \sigma_1 \left(1 - \frac{T}{S_1}\right) \leq [\sigma = R_2^*], \quad (52)$$

где σ_1 и σ_2 — дополнительные нормальные напряжения на контуре выработок, действующие на горизонтальные площадки, расположенные посередине высоты их бортов.

Прочие обозначения даны на рис. 19.

В этих формулах принято: $m \leq 0,5(k-1)$, где k берется по табл. 3; $S = 5a$,

где a — полуширина соответствующей выработки;

$$\sigma = (k-1)\gamma H.$$

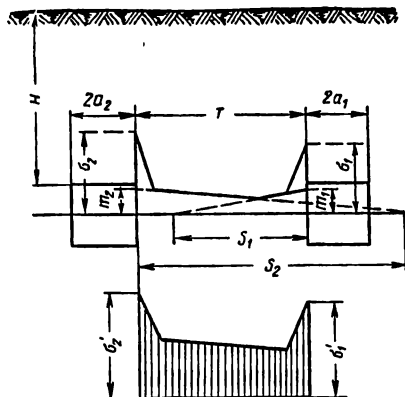


Рис. 19. Распределение напряжений в опорных целиках (по П. М. Цимбаревичу)

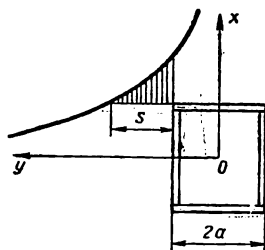


Рис. 20. К расчету целика между двумя горными выработками (по В. Д. Слесареву)

Метод расчета, предложенный С. С. Давыдовым, аналогичен методам М. М. Протодяконова и П. М. Цимбаревича, изложенным в настоящей работе, и страдает теми же недостатками.

Метод В. Д. Слесарева

Этот метод основан на гипотезе, что напряжения в целике между двумя выработками распределены по закону равнобочной гиперболы¹, как показано на рис. 20 [2] и [5].

Расстояние от стенки выработки, на котором сказывается давление вышележащих пород, зависит от их физико-механических свойств.

Для определения этого расстояния В. Д. Слесаревым предложены следующие формулы: для несвязных пород

$$s = \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{8a}; \quad (53)$$

¹ Разбирая метод В. Д. Слесарева, автор ограничивается констатацией только того факта, что результаты расчета по формулам В. Д. Слесарева не согласуются с данными практики, но не дает оценки теории в целом. (Прим. ред.)

для связных пород

$$s = \frac{2HR_1}{2\gamma_0 a}. \quad (54)$$

Ширина опорного целика должна удовлетворять условию

$$T \leq s. \quad (54 \text{ бис})$$

В этих формулах обозначены:

H — глубина от кровли выработки до земной поверхности, m ;

$2a$ — ширина выработки, m ;

φ — угол внутреннего трения несвязных пород, $град$;

γ_0 — средний объемный вес вышележащих пород, t/m^3 ;

R_1 — прочность породы целика на сжатие, t/m^2 .

Рассчитанные по этим формулам размеры целиков не соответствуют [3] принятым на практике.

Для их успешного применения необходимы, по-видимому, некоторые дополнительные условия.

Метод расчета М. Стаматиу

Если обозначить:

γ_a — средний объемный вес вышележащих пород, включая потолочину, t/m^3 ;

H — глубина от кровли камер до дневной поверхности, m ;

d — ширина камер, m ;

h — высота камер, m ;

d_1 — ширина столба, m ;

l — длина столба, m

и допустить распределение напряжений в массиве в соответствии с гипотезами Риттера-фон Вильмана и Кулона-Риббана, можно заключить (рис. 21):

1) часть столба шириной d_2 подвергнута давлению $P = \gamma_a H$, t/m^2 ;

2) примыкающие к камерам части столба шириной $h \operatorname{ctg} \varphi$ воспринимают вес образующихся в кровле камер сводов равновесия, под действием которого должно произойти скольжение по плоскостям AE и соответственно $A'E'$, составляющим угол φ с горизонтальной плоскостью.

Принимая во внимание вышеизложенное, имеем

$$d_1 = d_2 + 2h \operatorname{ctg} \varphi. \quad (54a)$$

На основании лабораторных испытаний призматических образцов с квадратным основанием установлено

$$R'_c = R_c \sqrt{\frac{l}{h}}, \quad (54б)$$

где R'_c — прочность образца на сжатие, $кг/см^2$;

R_c — прочность образца кубической формы из того же материала, $кг/см^2$;

l — сторона основания образца, $см$;

h — высота образца, $см$.

Столб $GEE'G'$ (рис. 21) представляет собой призму высотой h со стороны квадрата основания d_2 , к которой применима формула (54б).

Для такой призмы условие прочности запишется в виде

$$Pd_2^2 = R'_c d_2^2 = R_c \sqrt{\frac{d_2}{h}} d_2^2 \text{ или } P = \gamma_a H \leq R_c \sqrt{\frac{d_2}{h}}. \quad (54\text{в})$$

Для предельного случая имеем

$$\gamma_a H = R_c \sqrt{\frac{d_2}{h}}$$

$$\text{или } d_2 = \frac{\gamma_a^2 H^2 h}{R_c^2}.$$

С учетом этих зависимостей формулу (54а) можно переписать в виде

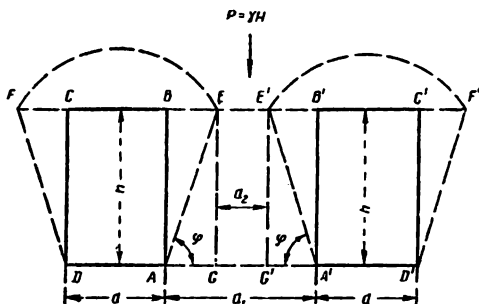


Рис. 21. К расчету целика между горными выработками (по М. Стаматиу)

$$d_1 = \frac{\gamma_a^2 H^2 h}{R_c^2} + 2h \operatorname{ctg} \varphi = \left(\frac{\gamma_a^2}{R_c^2} H^2 + 2 \operatorname{ctg} \varphi \right) h. \quad (54\text{г})$$

Для каменной соли можно принять: $\gamma_a = 2,2 \text{ т/м}^3$; $R_c = 300 \text{ кг/см}^2 = 3000 \text{ т/м}^2$; $\varphi = 45^\circ + \rho/2 = 75^\circ$, где $\rho = 60^\circ$ — угол внутреннего трения для каменной соли по Бёргеру [15]*, и записать формулу (54г) в виде

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} H^2 + 0,536) h. \quad (54\text{д})$$

Методы расчета, основанные на теории упругости

Метод П. М. Цимбаревича

П. М. Цимбаревич считает, что эпюра сжимающих напряжений в целике между двумя горными выработками имеет вид, представленный на рис. 22 [7].

Для простоты автор заменяет кривую st прямыми 1—1 и 2—2.

Отрезки m и n , отсекаемые этими прямыми на вертикальной и горизонтальной осях координат, определяются на основании эксперимента по формулам:

$$m \leq 0,5(k - 1) \text{ и } n \leq 0,3a. \quad (55)$$

* Угол внутреннего трения для каменной соли около 20° , рекомендованная величина 60° найдена исходя из неверного предположения, что огибающая главных кругов напряжения является прямой, касательной к кругам одноосного растяжения и сжатия. (Прим. ред.)

Прочие элементы эпюры определяются по формулам:

$$L_1 \cong 2,5a_1 \text{ и } L_2 \cong 2,5a_2; \quad (56)$$

$$\sigma'_1 = (k_1 - 1)\gamma Z \text{ и } \sigma'_2 = (k_2 - 1)\gamma Z. \quad (57)$$

В этих формулах обозначены:

a_1 и a_2 — ширина выработок;

L_1 и L_2 — размер зоны влияния;

B — ширина целика;

σ'_1 и σ'_2 — дополнительные вертикальные нормальные напряжения в серединах стен выработок;

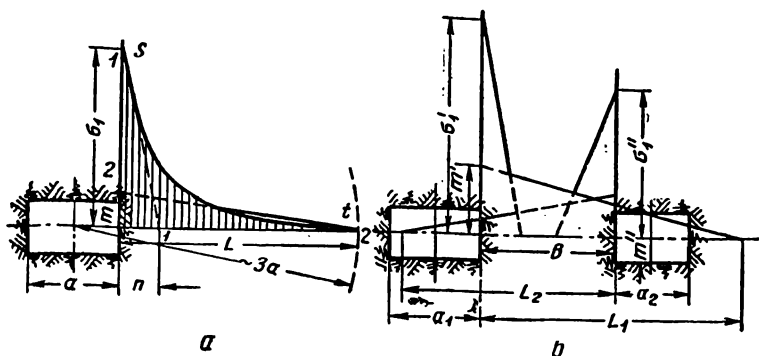


Рис. 22. К расчету целика между двумя горными выработками (по П. М. Цимбаревичу)

k_1 и k_2 — коэффициенты концентрации напряжений $\sigma_{\max}$ в тех же точках;

m' и m'' — величины, относящиеся к эпюре дополнительных напряжений;

γ — средний объемный вес породы;

Z — глубина от дневной поверхности.

Значения коэффициента k (k_1 или k_2) приведены в табл. 3 [7].

Таблица 3

Сечение	Кру- говое	Эллиптическое			Прямоугольное						
высота	—	2:3	3:2	3:1	18:1	5:1	3:1	1:1	1:3	1:5	1:18
ширина	—	3:75	2:2	1:0	0,80	0,96	1,00	1,30	2,00	2,25	5,00
k	2,75	3,75	2,2	1,0	0,80	0,96	1,00	1,30	2,00	2,25	5,00

Из эпюры, приведенной на рис. 22, следует

$$B < \frac{L_1 + L_2}{2} = \frac{2,5(a_1 + a_2)}{2} \quad (58)$$

или в случае $a_1 = a_2 = a$

$$B < 2,5a. \quad (59)$$

С помощью неравенства (58) можно проверить опорный целик на прочность.

Этот метод проверки не учитывает остальные два размера целика — высоту и длину. Кроме того, с помощью зависимости (58) можно лишь проверить заранее заданную ширину целика, причем нижний предел величины B не указан. Для этого необходимо соблюсти следующие условия, относящиеся к прочности и устойчивости столба:

$$\sigma_1^{(1)} = \left[k_1 + m''(k_2 - 1) \left(1 - \frac{B}{2,5a_2} \right) \right] \gamma Z \leq [R_2^*]; \quad (60)$$

$$\sigma_2^{(2)} = \left[k_2 + m'(k_1 - 1) \left(1 - \frac{B}{2,5a_2} \right) \right] \gamma Z \leq [R_2^*], \quad (61)$$

где $\sigma_1^{(1)}$ и $\sigma_2^{(2)}$ — суммарные вертикальные нормальные напряжения в серединах стен выработок (см. рис. 22);

$[R_2^*]$ — допускаемое напряжение на двухосное сжатие породы целика, если его длина значительно больше ширины, или же на одноосное сжатие, если его длина не слишком велика по сравнению с шириной.

Допускаемые напряжения на двухосное сжатие $[R_2^*]$ и соответственно прочность породы на двухосное и одноосное сжатие определяются лабораторными испытаниями.

Метод проверки, предложенный П. М. Цимбаревичем, имеет следующие существенные недостатки:

- 1) неполностью учитываются физико-механические свойства породы целика;
- 2) затруднительно получение необходимых для расчета данных;
- 3) применение метода для практических расчетов ввиду его сложности затруднительно [3];
- 4) рассчитанные по данному методу размеры целиков не соответствуют принятым на практике.

Поэтому метод получил ограниченное распространение.

Метод К. В. Руппенейта

В работе [4] К. В. Руппенейт предложил новый метод проверки целиков на прочность, основанный на теории предельного равновесия. Метод заключается в независимом решении двух задач: определении разрушающей нагрузки для столба данных размеров и определении фактической нагрузки на этот столб.

Отношение этих двух нагрузок дает коэффициент запаса.

Метод основан на гипотезе, что напряжения в целике распределены неравномерно, причем распределение их зависит от отноше-

ния размеров целика (высоты к ширине или наоборот) и от физико-механических свойств породы. С этой точки зрения автор различает: узкие столбы с отношением ширины к высоте $\frac{a}{b} \leq 1$, столбы средней ширины, для которых $1 < \frac{a}{b} < 3,5$ и широкие столбы, для которых $\frac{a}{b} > 3,5$.

Для определения напряженного состояния целиков при разрушающей нагрузке автор применяет графический метод Мора, основанный на понятии огибающей главных кругов напряжений.

В качестве огибающей принимается

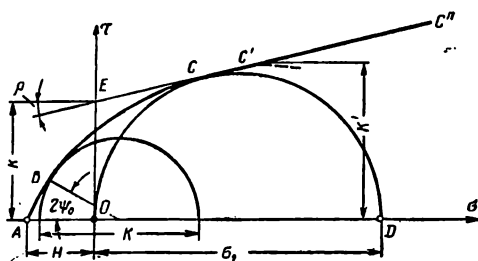


Рис. 23. Циклоидальная огибающая, переходящая в касательную прямую (по К. В. Руппенейту)

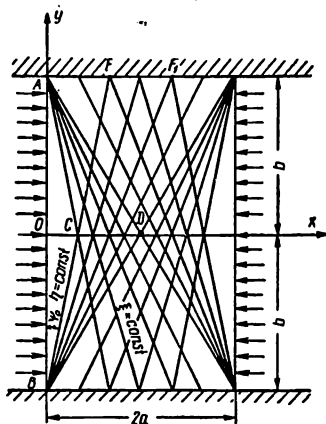


Рис. 24. Обозначения размеров и сетка линий скольжения в целике при $\alpha = \frac{a}{b} < 1$ (по К. В. Руппенейту)

циклоида, параметрическое уравнение которой в прямоугольных осях σ и τ (рис. 23) выглядит следующим образом:

$$\sigma + H = \frac{1}{2} K' (4\psi_0 - \sin 4\psi_0) \text{ и } \tau = \frac{1}{2} K' (1 - \cos 4\psi_0). \quad (62)$$

Уравнение прямой касательной к огибающей

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + K. \quad (63)$$

В этих формулах:

- σ — нормальное напряжение на площадке сдвига;
- τ — касательное напряжение на площадке сдвига;
- H — предел прочности на растяжение;
- K' — диаметр образующего круга циклоиды, определяемый по приводимой ниже формуле;
- ρ — угол внутреннего трения;

ψ_0 — угол (см. рис. 23), определяемый по приводимой ниже формуле

$$K' = \frac{H - K \operatorname{ctg} \rho}{\frac{\pi}{2} - \rho - \operatorname{ctg} \rho}; \quad 2\psi_0 = \frac{\pi}{2} - \rho. \quad (64)$$

Для определения разрушающей нагрузки на целик К. В. Рупенейт предложил следующие формулы:

а) Узкие столбы с отношением ширины к высоте

$$\alpha = \frac{a}{b} \leq 1.$$

Автор доказал, что эти целики находятся в напряженном состоянии, соответствующем криволинейному участку огибающей.

Разрушающее напряжение (на отрезке OD , см. рис. 24) определяется из выражения

$$P_p = 4aK' \left(\operatorname{arctg} \alpha + \frac{1}{\alpha} \sin^2 \psi_0 \right) - 2aH, \quad (65)$$

где $2a$ — ширина целика;

K' — диаметр образующего круга циклоиды;

$$\alpha = \frac{a}{b};$$

$2b$ — высота целика;

$\sin^2 \psi_0$ — для различных ψ_0 см. табл. 4;

H — предел прочности породы на растяжение.

Угол ψ_0 определяется для предельного случая из выражения

$$2\psi_0 - \sin 2\psi_0 = \frac{\rho + H}{K'}, \quad (66)$$

где ρ — боковое давление на целик. Прочие обозначения прежние.

Таблица 4

$\frac{\rho + H}{K'}$	$2\psi_0$	$\sin^2 \psi_0$	$2\psi_0 + \sin 2\psi_0$	$\frac{\rho + H}{K'}$	$2\psi_0$	$\sin^2 \psi_0$	$2\psi_0 + \sin 2\psi_0$
0,00	0,000	0,0000	0,000	0,30	1,249	0,3418	2,198
0,02	0,495	0,0859	0,970	0,32	1,277	0,3552	2,234
0,04	0,626	0,0948	2,212	0,34	1,305	0,3675	2,270
0,06	0,716	0,1228	1,372	0,36	1,332	0,3818	2,303
0,08	0,791	0,1485	1,502	0,38	1,357	0,3939	2,334
0,10	0,854	0,1715	1,608	0,40	1,382	0,4062	2,365
0,12	0,909	0,1927	1,698	0,42	1,407	0,4185	2,393
0,14	0,958	0,2124	1,776	0,44	1,430	0,4298	2,420
0,16	1,003	0,2311	1,846	0,46	1,453	0,4412	2,456
0,18	1,045	0,2534	1,910	0,48	1,476	0,4527	2,471
0,20	1,084	0,2662	1,968	0,50	1,497	0,4631	2,495
0,22	1,120	0,2882	2,020	0,52	1,519	0,4742	2,518
0,24	1,155	0,2980	2,070	0,54	1,540	0,4846	2,540
0,26	1,187	0,3128	2,114	0,56	1,560	0,4946	2,560
0,28	1,219	0,3277	2,158	0,575	1,575	0,5000	2,580

При $H = 0$ и $\psi_0 = 0$ (сильнотрещиноватые породы) формулу (65) можно записать в виде

$$P_p = 4aK' \operatorname{arc} \operatorname{tg} \alpha. \quad (67)$$

Автор отмечает, что формулы (65) и (67) верны при соблюдении условий¹

$$2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\pi}{2} - \rho \text{ и } \operatorname{tg} \delta \geq \frac{(a^2 + b^2) \cos 2\psi_0 + a^2 - b^2}{(a^2 + b^2)(2\psi_0 + \sin 2\psi_0 + 2 \operatorname{arctg} \alpha) + ab}. \quad (68)$$

б) Целики с отношением ширины к высоте

$$1 < \alpha = \frac{a}{b} \leq 5.$$

Напряженное состояние этих столбов, относящихся к числу широких, может соответствовать как криволинейному, так и прямолинейному участкам огибающей.

Разрушающая нагрузка на столб для участков OD и DE средней линии (рис. 25) вычисляется по формулам:

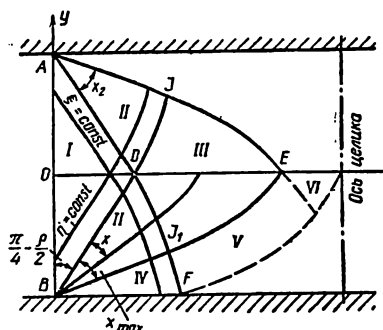


Рис. 25. Области, отвечающие крайевым задачам в целике $\alpha > 1$ при использовании прямолинейного участка огибающей кругов напряжений (по К. В. Руппенейту)

$$P_{OD} = 2b \left(\frac{\pi K'}{2} - H \right) + 4bK' \sin \psi_0; \quad (69)$$

$$P_{DE} = 2K' \Omega_6(\chi) + 2K' \left(\frac{\pi}{2} - \frac{H}{K'} + 1 \right) (x_E - b),$$

где

$$\Omega_6(\chi) = \sum_1^n (\chi_{i+1} + \chi_i) (x_{i+1} - x_i). \quad (70)$$

В этих выражениях значения $\Omega_6 = \Omega_3$ берутся из табл. 5, а прочие обозначения прежние.

При $H = 0$ (сильнотрещиноватые породы) формула (70) записывается в виде

$$P_{DE} = 2K' \Omega_3(\chi) + 5,14 K' (x_E - b). \quad (71)$$

Разрушающая нагрузка на отрезке $OE \leq x \leq a$ (см. рис. 25) определяется из выражения²

$$P_E = 2[a - \alpha(\chi)b] \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2\chi + 1 \right) K' - H \right]. \quad (72)$$

¹ где δ — угол трения на контакте целика и потолочины (Прим. ред.)

² где χ находится из граничных условий [4] (Прим. ред.)

Таблица 5

n	χ	$\chi_{\text{рад}}$	$x_i = \frac{a}{b}$	α_i	n	χ	$\chi_{\text{рад}}$	$x_i = \frac{a}{b}$	α_i
0	0°00'	0,000	1,00	0,000	7	26°15'	0,462	2,21	0,604
1	3 45	0,065	1,14	0,009	8	30 00	0,527	2,45	0,842
2	7 30	0,132	1,29	0,039	9	33 45	0,589	2,71	1,132
3	11 15	0,198	1,45	0,091	10	37 30	0,656	2,99	1,480
4	15 00	0,264	1,62	0,170	11	41 15	0,722	3,31	1,920
5	18 45	0,330	1,80	0,277	12	45 00	0,785	3,66	2,447
6	22 30	0,396	1,99	0,415	—	—	—	—	—

в) Целики с отношением ширины к высоте

$$\alpha = \frac{a}{b} > 5.$$

Эти столбы относятся к числу весьма широких. Автор отмечает, что определение разрушающей нагрузки на весьма широкие столбы производится по схеме, не отличающейся принципиально от только что изложенной при $1 < \alpha = \frac{a}{b} \leq 5$.

Разница лишь в более трудоемких расчетах.

Фактическую нагрузку на столб К. В. Руппенейт рекомендует определять по методу Д. И. Шермана [11—14], установившего следующую общую формулу:

$$P = K\gamma_a h a', \text{ т/м},$$

где P — нагрузка на 1 м длины целика;

K — коэффициент увеличения нагрузки на столб, зависящий от формы и размеров ограничивающих его камер и от высоты целика;

γ_a — средний объемный вес вышележащих пород, т/м³;

h — глубина от дневной поверхности до кровли камер, м;

a' — ширина целика, м.

Значение фактической нагрузки на столб, определяемое по приведенной выше формуле, мало отличается от веса пород, приходящегося на целик.

Зная разрушающую и фактическую нагрузки на столб, можно определить коэффициент запаса $n = \frac{P}{P'}$.

Основанный на использовании теории упругости и пластичности метод расчета, предложенный К. В. Руппенейтом, представляет собой важный шаг вперед в решении вопроса; его оригинальность состоит в учете специфических характеристик пород и применении теории предельного равновесия для криволинейного участка огибающей главных кругов Мора.

Как будет показано на примерах во второй части книги, результаты расчетов по методу К. В. Руппенейта хорошо согласуются с данными практики¹.

Для применения метода необходимо определить некоторые механические характеристики пород, правильно построить огибающую и внимательно использовать приведенные выше проверочные формулы.

Эмпирические и полуэмпирические методы, установленные немецкой, американской и английской горной практикой

Метод Г. Бёргера

В журнале «Kali» за 1929 г. [15] Бёргер предложил следующую эмпирическую формулу, пригодную для камер прямоугольного сечения:

$$p = \frac{ab}{\left(\frac{940}{h} - 1\right)(a + b)} + 0,54f, \quad (73)$$

где p — ширина опорного целика, m ;

h — глубина разработок, m ;

a — ширина камер, m ;

b — длина камер, m ;

f — высота камер, m .

С теоретической точки зрения эта формула применима только при $h < 940$ m , так как при $h = 940$ m $p = \infty$, а при $h > 940$ m p становится отрицательной величиной.

При $h < 940$ m формула Бёргера дает, вообще говоря, завышенные размеры целиков. Так, например, если взять случай соляных разработок камерами обычных размеров: $a = 20$ m , $b = 100$ m , $f = 12$ m , получим:

$$h = 300, \quad p \cong 14 \text{ м};$$

$$h = 400, \quad p \cong 19 \text{ м};$$

$$h = 500, \quad p \cong 26 \text{ м};$$

$$h = 800, \quad p \cong 101 \text{ м}.$$

Эти размеры целиков значительно больше встречающихся в практике разработки солей на данных глубинах. Кроме того, в формулу Бёргера не входит весьма важная с точки зрения расчета целиков величина — сопротивление породы сжатию, что является ее серьезным недостатком. По этим причинам формула Бёргера не нашла применения на практике.

¹ При использовании формул для определения несущей способности целиков по теории предельного равновесия М. Стаматиу принял совершенно неверное, завышенное втрое значение угла внутреннего трения для каменной соли. Поэтому соответствующие примеры расчета пришлось выправить, приняв $\rho = 20^\circ$, что, однако, не сказалось на окончательных выводах, так как скомпенсировались другие ошибки, допущенные М. Стаматиу в его расчетах (*Прим. ред.*)

*Эмпирические и полуэмпирические методы (из опыта США
и Англии)*

Ниже приведены некоторые эмпирические формулы, опубликованные в соответствующей специальной литературе [5] и получившие некоторое распространение в Англии и США.

Формула для проверки целиков на прочность

$$S = C \sqrt{\frac{\omega}{t}}, \quad (74)$$

где S — допускаемое напряжение для породы столба на сжатие, $т/фут^2$;

C — прочность породы целика на сжатие, определяемая лабораторными испытаниями образцов кубической формы, $т/фут^2$;

ω — ширина целика, футы;

t — высота целика, футы.

Формула для определения ширины опорного целика

$$\omega = \left(\frac{160 d}{2000 t C} \right)^2 t, \quad (75)$$

где ω — ширина целика, футы;

d — глубина разработок, футы;

l — процент угля, оставляемого в целике;

C — прочность угля на сжатие, $т/фут^2$.

Проверочная формула

$$YZ = 1000 \left(0,7 + 0,3 \frac{b}{k} \right) b, \quad (76)$$

где Y — глубина разработок;

k — высота столба;

b — ширина столба;

Z — расстояния между осями камер.

Все размеры в футах.

Проверочная формула

$$S = k \sqrt{R}, \quad (77)$$

где S — разрушающая нагрузка на столб;

k — отношение сторон основания целика;

R — высота целика.

Формула для расчета размеров целиков на шахтах, разрабатывающих битуминозные угли средней крепости при хороших почве и кровле,

$$W = \frac{tD}{100}, \quad (78)$$

где W — ширина столба;

t — мощность угольного пласта;

D — глубина разработки.

Формулы (76)–(78) применяются в США и Англии главным образом для расчета целиков на угольных шахтах, где широко распространена камерно-столбовая система разработки.

Часть вторая

РАСЧЕТ И ПРОВЕРКА ЦЕЛИКОВ НА СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ РНР

Рассмотренные в первой части методы были применены для расчета целиков на двух румынских соляных рудниках.

На первом из них — руднике им. 23 августа месторождения Окна Мурешулуй целики были сильно повреждены и работы пришлось прекратить.

На втором — руднике «Старая Молдавия» месторождения Тыргу Окна центральный целик находился в хорошем состоянии, несмотря на то, что к моменту окончания работ высота ограничивающих его камер достигла 83 м.

Кроме того, были проверены размеры центрального целика рудника «Новая Молдавия» того же месторождения.

Так как горногеологические условия этих рудников, а также физико-механические свойства каменной соли месторождений Окна Мурешулуй и Тыргу Окна хорошо изучены, представилось возможным проверить на практике различные методы расчета и выявить наилучшие.

Приводимые примеры позволили впервые уточнить ряд входящих в расчетные формулы параметров, что дает возможность применять соответствующие методы при проектировании новых рудников и проверке целиков на действующих рудниках.

Г л а в а I

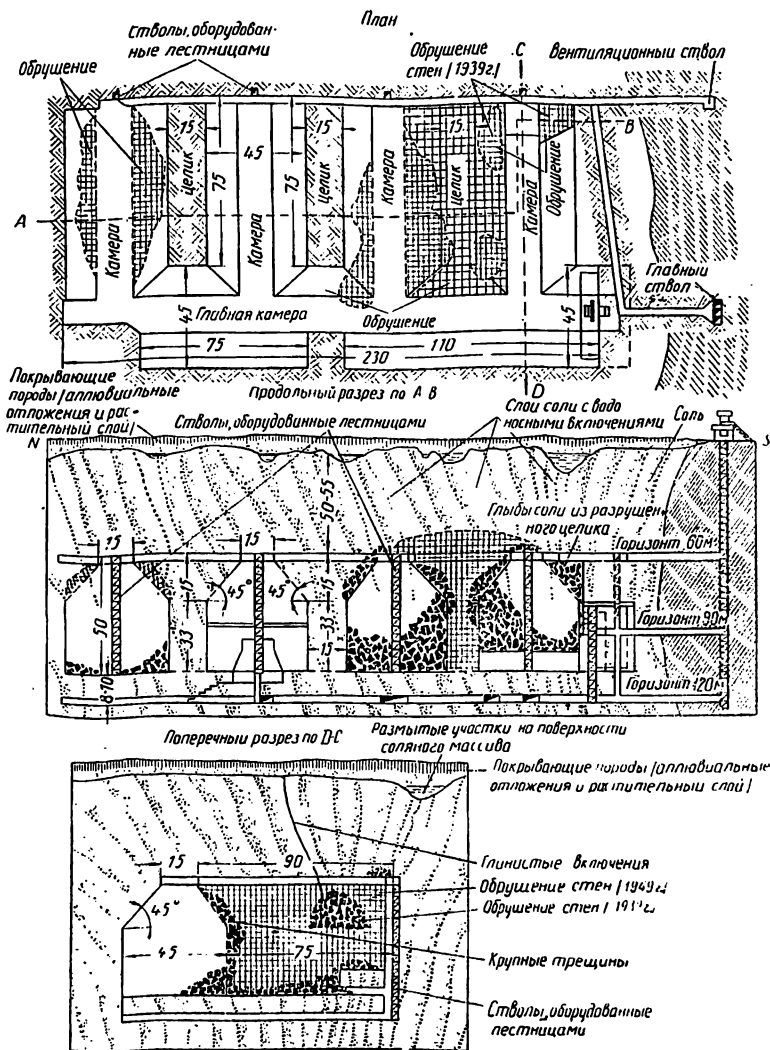
РУДНИК ИМ. 23 АВГУСТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОКНА МУРЕШУЛУЙ

Общие сведения о руднике

На руднике им. 23 августа каменная соль разрабатывается камерно-столбовой системой с длинными промежуточными столбами [45] на глубине 57—60 м от поверхности земли.

Мощность покровных аллювиальных отложений составляет 5—10 м.

Шахтное поле вскрыто в 1870 г. двумя вертикальными стволами, пройденными по породе в непосредственной близости от залежи.



Горные работы представлены центральной камерой длиной 230 м, направленной с севера на юг, и четырьмя перпендикулярными к ней камерами, направленными с востока на запад и разделенными тремя опорными целиками размерами 15×75 м (рис. 26). Центральная камера длиной 230 м соединяется со стволами двумя квершлагами на горизонтах 60 и 90 м. Кроме того, на гор. 120 м был подготовлен новый этаж, отделенный от вышележащего целиком мощностью 8—10 м. Впоследствии работы на этом этаже были прекращены.

Поперечные камеры длиной 75 м — тупиковые. В забое каждой камеры имеется слепой ствол, оборудованный лестницами. Слепые стволы выходят на штрек, соединяющий поперечные камеры с вентиляционным стволом. Разработка ведется под защитой потолочины мощностью 50—55 м. Ширина камер по верху 15 м, по низу — 45 м, высота от почвы до кровли 50 м. Из-за обрушений наклонных стен камер и разрушения столба I (между камерами I и II), явившихся следствием недостаточной ширины целиков и слишком большой ширины камер, а также из-за опасности затопления (рудник сбит со старыми затопленными рудниками) в 1948 г. работы на руднике им. 23 августа были прекращены.

После разрушения целика I общая ширина обнажения достигла 105 м, а в кровле образовался свод обрушения (см. рис. 26).

Кроме того, из-за уменьшения мощности потолочины вследствие сводообразования до 40 м не исключена возможность проседания земной поверхности. Под действием вод, циркулирующих в покрывающих массивах соли аллювиальных отложениях, потолочина может вообще провалиться.

Площадь разработок рудника им. 23 августа

$$S = 120 \cdot 230 = 27\,600 \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь целиков

$$s = 3 \cdot 15 \cdot 75 = 3375 \text{ м}^2.$$

Отношение $s : S = 3375 : 27\,600 = 0,122 = 12,2\%$.

Физико-механические характеристики каменной соли и покрывающих пород

Средний объемный вес каменной соли

$$\gamma_a = 2,15 - 2,20 \text{ т/м}^3.$$

Средний объемный вес покрывающих пород (водоносные пески и галька) равен $2,2 \text{ т/м}^3$.

Прочность образцов каменной соли на сжатие, определенная лабораторными испытаниями образцов кубической (5—20 см) формы: $R_c = 255 - 413 \text{ кг/см}^2$, в среднем 340 кг/см^2 , на растяжение $R_e = 7,7 - 34,3 \text{ кг/см}^2$, в среднем 18 кг/см^2 , на изгиб $R_i = 20,4 - 28,3 \text{ кг/см}^2$, в среднем 24 кг/см^2 и на срез $R_f = 23,2 - 46,4 \text{ кг/см}^2$, в среднем 28 кг/см^2 [43].

Величины прочности на сжатие в зависимости от качества и структуры каменной соли, определенные лабораторными испытаниями образцов кубической формы $10 \times 10 \times 10$ см, приведены в табл. 6.

Величины прочности каменной соли на сжатие в зависимости от качества соли и размеров образцов (кубики и призмы с квадратным основанием) приведены в табл. 7.

Таблица 6

Направление усилия	Прочность на сжатие, кг/м ²		
	Белая соль	Пестрая соль	Серая соль
Параллельно напластованию	255	255	290
Наклонно к напластованию	303	260	325
Перпендикулярно к напластованию	337	364	350
Среднее	298	293	322

Таблица 7

Высота образцов, см	Прочность на сжатие, кг/см ² , при площади основания образцов, см ²			
	5×5	10×10	15×15	20×20

Белая соль

5	266	443	603	660
10	163	298	480	509
15	159	265	347	415
20	153	228	337	396

Пестрая соль

5	275	613	683	680
10	183	360	470	528
15	171	295	367	433
20	132	181	333	413

Серая соль

5	317	603	685	698
10	177	322	444	538
15	167	295	375	396
20	164	163	326	377

Глава II

РУДНИКИ «СТАРАЯ МОЛДАВИЯ» И «НОВАЯ МОЛДАВИЯ»
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЫРГУ ОКНА

Общие сведения

Рудник «Старая Молдавия» начал работать в первой половине прошлого века. Сначала работы велись в колоколообразной камере, так называемой «Окнице», затем (около 1870 г.) были сооружены четыре камеры трапециевидной формы неодинаковой ширины, ограничивающие центральный целик (рис. 27).

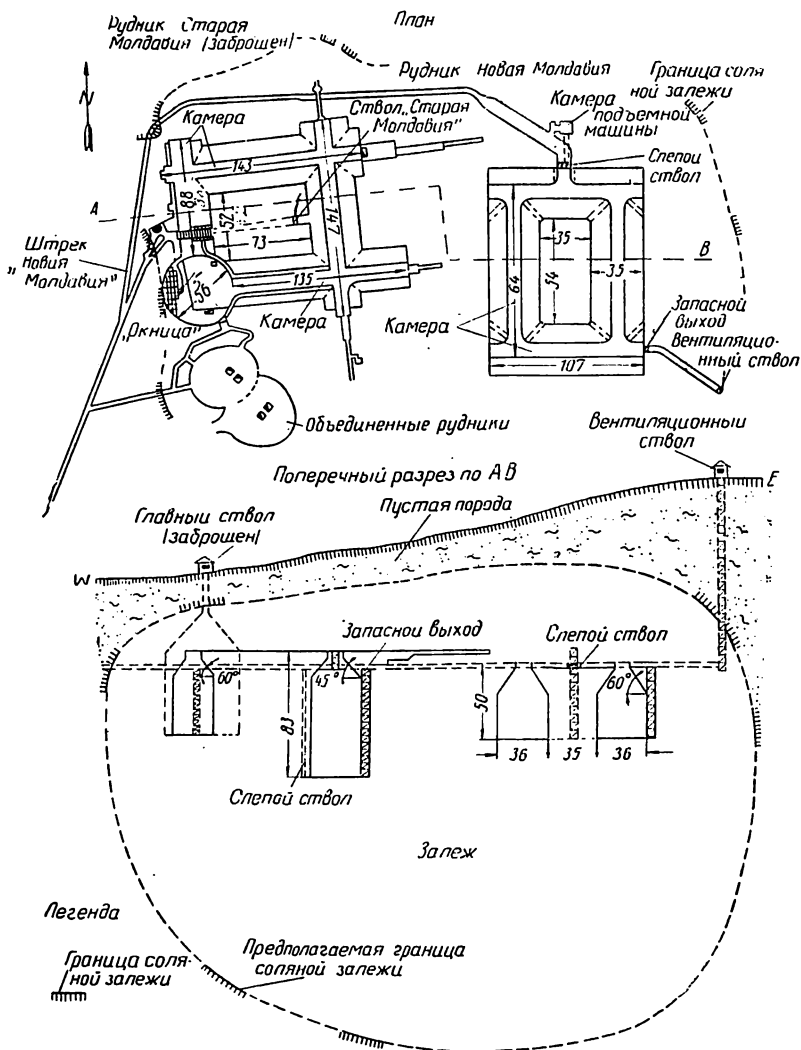


Рис. 27. План и разрез по рудникам «Старая Молдавия» и «Новая Молдавия» месторождения Тыргу Окна

Средняя глубина разработки составляла 65 м. Мощность покрывающих пород — 30 м. Размеры камер составляли: ширина по верху 10, 12, 12,5 и 17 м; по низу — 28, 34, 36 и 37 м; высота от почвы до кровли 83 м; длина 88, 135, 143 и 147 м.

Средняя мощность потолочины равна 35 м.

Центральный целик имел следующие размеры: длина по низу 73 м; ширина по низу 52 м; высота от почвы до наклонных стен 68 м; от почвы до контрольных балконов 80,5 м; от почвы до кровли 83 м.

Площадь разработок $S = 172 \cdot 145 = 24\,940 \text{ м}^2 \cong 25\,000 \text{ м}^2$.

Площадь центрального опорного целика

$$s = 73 \cdot 52 = 3796 \text{ м}^2 = 3800 \text{ м}^2.$$

Отношение $s : S = 3800 : 25\,000 = 0,152 = 15,2\%$.

В 1951 г. по достижении камерами максимальных размеров работы были прекращены.

Отметим, что к моменту прекращения работ центральный целик находился в хорошем состоянии; не наблюдалось никаких трещин или вывалов.

Рудник «Новая Молдавия» начал строиться в 1936 г. и был сдан в эксплуатацию в 1950 г. Он расположен восточнее рудника «Старая Молдавия», от которого отделен целиком шириной 50—70 м. Горные работы ведутся на глубине 105 м и представлены 4 камерами трапециевидного сечения, ограничивающими центральный целик длиной 64 м, шириной 35 м. От слепого ствола «Новая Молдавия» пройден штрек до квершлага «Старой Молдавии». Отметка кровли камер «Новой Молдавии» на 12 м ниже отметки кровли камер «Старой Молдавии» (рис. 27).

Мощность покрывающих пород составляет 35 м. Геометрические размеры камер: ширина по верху 10 м, по низу — 36 м; угол наклона стен 60° ; максимальная высота от почвы до кровли 50 м; длина I и II камер равна 107 м; III и IV камер — 64 м и равна длине центрального целика по низу.

Средняя мощность потолочины составляет 35 м.

Площадь разработок

$$S = 107 \cdot 136 = 14\,552 \text{ м}^2.$$

Площадь центрального целика

$$s = 35 \cdot 64 = 2240 \text{ м}^2.$$

Отношение $s : S = 2240 : 14\,552 = 0,154 = 15,4\%$.

Физико-механические свойства каменной соли и покрывающих пород месторождения Тыргу Окна

Средний объемный вес каменной соли $\gamma_a = 2,15\text{—}2,20 \text{ т/м}^3$, средний объемный вес покрывающих пород (сланцы, песчаники, мергели) $2,2 \text{ т/м}^3$.

Прочность каменной соли на сжатие, определенная лабораторными испытаниями образцов кубической (размером 5—20 см) формы, $R_c = 210\text{—}350 \text{ кг/см}^2$, в среднем 300 кг/см^2 [43], на растяжение $R_e = 17,6\text{—}22,4 \text{ кг/см}^2$, в среднем $19,6 \text{ кг/см}^2$, на изгиб $R_i = 37,3\text{—}42,6 \text{ кг/см}^2$, в среднем $38,3 \text{ кг/см}^2$ [43], на срез $R_f = 26,0\text{—}33,3 \text{ кг/см}^2$, в среднем 30 кг/см^2 .

Величина прочности каменной соли на сжатие в зависимости от качества и структуры соли, определенная лабораторными испытаниями кубических образцов $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$, приведена в табл. 8.

Таблица 8

Направление усилия	Прочность на сжатие, кг/см^2		
	Белая соль	Пестрая соль	Серая соль
Параллельно напластованию	321	316	326
Наклонно к напластованию	275	326	328
Перпендикулярно к напластованию	354	330	329
Среднее	287	324	328

Прочность каменной соли на сжатие в зависимости от качества соли и размеров образцов (кубики и призмы с квадратным основанием) дана в табл. 9.

Прочность при механических воздействиях (сжатии, растяжении, изгибе и срезе) определялась испытанием образцов однородной соли, не обнаруживших дефектов при проверке оптическими и акустическими методами.

Таблица 9

Высота образцов, см	Прочность на сжатие, кг/см^2 , в зависимости от площади основания образцов, см^2			
	5×5	10×10	15×15	20×20

Белая соль

5	249	445	642	660
10	151	287	410	514
15	136	187	308	408
20	103	171	296	321

Пестрая соль

5	221	426	703	705
10	177	324	404	510
15	151	240	344	429
20	121	200	283	350

Серая соль

5	210	469	723	725
10	204	328	450	509
15	147	229	331	405
20	116	180	293	340

Однако эти результаты, по-видимому, несколько завышены, так как в действительности соль в месторождениях не является, как известно, вполне однородным с точки зрения петрографических и механических свойств материалом.

Как указывалось выше, эту неоднородность необходимо учитывать введением коэффициента запаса, характеризующего данную породу или полезное ископаемое.

Глава III

ПРОВЕРКА НА ПРАКТИКЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРОВЕРОЧНЫХ ФОРМУЛ, ПРЕДЛОЖЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ АВТОРАМИ

Рудник им. 23 августа

Метод Турнера

Для рудника им. 23 августа отношение

$$\frac{S}{H} = \frac{27\,600}{60} = 460.$$

С другой стороны, отношение $\frac{H}{L}$, где L ширина площади разработок, меньше единицы: $\frac{H}{L} = \frac{60}{230}$ или $\frac{60}{120}$ в соответствии с тем, какой размер площади разработок считать шириной; следовательно, целики следует считать загруженными весом всей вышележащей толщи, приходящейся на площадь разработок.

Проверку производим по формуле

$$\frac{\varphi}{k} \geq \delta H.$$

Для рудника им. 23 августа входящие в эту формулу параметры принимают следующие значения:

$$\varphi = 340 \text{ кг/см}^2 = 3400 \text{ т/м}^2; \quad k = \frac{S}{s} = \frac{27\,600}{3375} = 8,17.$$

$$\delta H = 2,2 \cdot 60 = 132 \text{ т/м}^2.$$

Подставляя эти значения в формулу (12), получим

$$\frac{\varphi}{k} = \frac{3400}{8,17} = 416 \text{ т/м}^2 > \delta H = 2,2 \cdot 60 = 132 \text{ т/м}^2.$$

Другими словами размеры целиков удовлетворяют условию (12), т. е. должны быть прочными, что противоречит действительности: целик I (см. рис. 26) рухнул еще до 1950 г., а на прочих целиках наблюдались трещины и вывалы.

Это противоречие объясняется тем, что принятые величины прочности не соответствуют действительности. В самом деле, в формулу (12) мы подставили среднее значение прочности на сжатие φ соли

месторождения Окна Мурешулуй, определенное испытанием кубических (5—20 см) образцов.

По-видимому, среднее значение φ больше, чем средняя несущая способность столба I как по причине его призматической формы ($\frac{h}{l} = \frac{50}{15} = 3,3$), так и вертикальной слоистости (рис. 28).

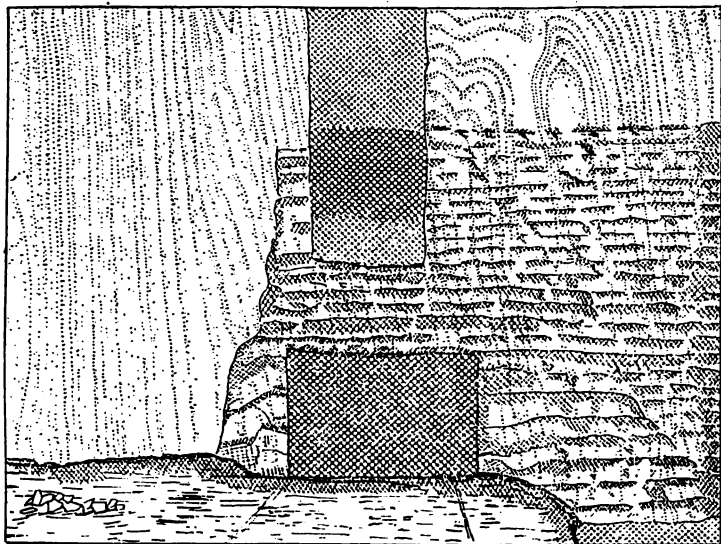


Рис. 28. Слоистость каменной соли (главная камера рудника им. 23 августа)

Действительно, по данным табл. 7, несущая способность образцов призматической формы с квадратным основанием при $\frac{h}{l} = 3$, т. е. почти таком же, как и в случае нашего целика, составляет:

	Прочность на сжатие
Белой соли	159 кг/см ²
Пестрой соли	171 »
Серой соли	167 »
В среднем	166 »

С другой стороны, данные табл. 6 говорят о том, что прочность образцов на 30% меньше при сжатии их вдоль напластования (255 кг/см² при сжатии вдоль и 364 кг/см² при сжатии поперек напластования).

Кроме того, не следует забывать, что на глубине 110 м (отметка почвы камер) каменная соль находится в состоянии малых пластических деформаций, так как $\delta H = \gamma H = 2,2 \cdot 110 = 242 \text{ т/м}^2 =$

$= 24,2 \text{ кг/см}^2$, а нижний предел малых пластических деформаций для пестрой соли месторождения Окна Мурешулуй равен $15\text{—}20 \text{ кг/см}^2$.

Из сказанного выше следует, что ширина столбов на руднике им. 23 августа оказалась недостаточной по достижении ими определенной высоты. В начале работ, до тех пор, пока высота столбов не превышала их ширины (15 м), имелся некоторый запас прочности. При увеличении же (по мере разработки) высоты столбов их несущая способность стала уменьшаться и одновременно появились пластические деформации, которые, увеличиваясь, вызвали трещинообразование, вывалы и, наконец, разрушение столба I. Остальные столбы не были разрушены, так как в камере 3 работы были прекращены раньше, т. е. отношение $h:l$ оказалось более благоприятным с точки зрения прочности.

Таким образом приходим к выводу, что проверочная формула Турнера в предложенном ее автором виде не пригодна для практических расчетов.

Для получения приемлемых результатов следует устанавливать прочность на сжатие φ с учетом формы и размеров целиков, направления слоистости в целике, неоднородности породы, геологических нарушений и т. д.

Если прочность на сжатие определяется испытанием образцов кубической (5—20 см) формы, проверочная формула (12) должна быть изменена следующим образом:

$$\frac{\varphi}{k} \geq \delta H, \quad \varphi = \frac{R_c}{n},$$

где n — коэффициент запаса;

R_c — прочность породы целика на сжатие, определенная испытанием образцов кубической (5—20 см) формы, т/м^2 ;

φ — допускаемое напряжение для породы целика на сжатие, т/м^2 .

Для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй $R_c = 3400 \text{ т/м}^2$ и формулу (12') можно переписать в виде

$$\frac{1}{k} = \frac{s}{S} \geq \frac{n \delta H}{R_c} = \frac{n \cdot 2,2 \cdot 60}{3400} = \frac{132 n}{3400},$$

где s — суммарная площадь целиков, м^2 ;

S — площадь разработок, м^2 .

При фактическом значении

$$\frac{s}{S} = \frac{3 \cdot 15 \cdot 75}{27600} = 0,122$$

получаем

$$n = \frac{0,122 \cdot 3400}{132} = 3,14.$$

Так как на руднике им. 23 августа целик шириной 15 м был разрушен при $\frac{s}{S} = 0,122$ и $n = 3$, заключаем, что в данных условиях необходимо принимать $n > 3$ и $\frac{s}{S} > 0,122$.

Если обозначить через x прочную ширину целика и учесть отношение $\frac{s}{S} = \frac{132n}{3400}$, получим для столбов длиной 75 м: при $n = 4$

$$\frac{s}{S} = \frac{3,37x}{(4 \cdot 45 + 3x)(75 + 45)} = 0,155, \quad x \cong 20 \text{ м};$$

при $n = 5$

$$\frac{s}{S} = \frac{3 \cdot 75 \cdot x}{(4 \cdot 45 + 3x)(75 + 45)} = 0,194, \quad x \cong 27 \text{ м}.$$

Отсюда вывод, что при высоте 50 м и коэффициенте запаса $n = 4-4,8$ прочная ширина столбов составила бы 20—25 м

$$\left(\frac{l}{h} = \frac{25}{50} = 0,5 \text{ и } \frac{l}{h} = \frac{20}{50} = 0,4 \right)$$

Метод Г. де Ля Гуниера

Эти формулы мы применим при двух расчетных гипотезах, предполагая, что:

а) разработка ведется камерно-столбовой системой с короткими столбами прямоугольного сечения;

б) применяется камерно-столбовая система со столбами в виде «стен».

В первом случае, согласно формуле (14), имеем

$$(p + g)(p' + g')H\Delta + pp'h\delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} pp'.$$

Входящие в эту формулу параметры принимают следующие значения: $p = 15 \text{ м}$; $p' = 75 \text{ м}$; $g = g' = 45 \text{ м}$; $H = 60 \text{ м}$; $\Delta = 2200 \text{ кг/м}^3$; $R = 340 \text{ кг/см}^2$; $n = 2$; $\delta = 2200 \text{ кг/м}^3$.

Подставляя эти значения получим

$$1074 \cdot 150\,000 < 1912 \cdot 500\,000.$$

Таким образом, зависимость (14) удовлетворяется при рекомендованном автором значении коэффициента запаса $n = 2$.

В предельном случае приведенные выше значения параметров удовлетворяют уравнению (14), если

$$\begin{aligned} n &= \frac{10\,000 R p p'}{(p + g)(p' + g')H\Delta + pp'h\delta} = \\ &= \frac{10\,000 \cdot 340 \cdot 15 \cdot 75}{(15 + 45)(75 + 45)60 \cdot 2200 + 15 \cdot 75 \cdot 2200 \cdot 50} = 3,56. \end{aligned}$$

Если принять вторую гипотезу, мы должны воспользоваться проверочной формулой (17)

$$\alpha \geq \frac{nH\Delta}{10\,000 R - nH\Delta},$$

где значения параметров прежние, а

$$\alpha = \frac{p}{g} = \frac{15}{45} = 0,33$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\alpha = 0,33 > \frac{2 \cdot 60 \cdot 2200}{10\,000 \cdot 340 - 2 \cdot 60 \cdot 2200} = 0,08.$$

Следовательно, и в этом случае условие (17) соблюдено, т. е. размеры целиков на руднике им. 23 августа должны быть достаточными. В предельном случае уравнение (17) удовлетворяется при $n = 6,3$.

Этот неверный вывод объясняется тем, что принятое допускаемое напряжение породы целика на сжатие не соответствует действительности ($R_{с. доп} = \frac{R_c}{n}$, где $n = 1,5-2$). Если принять среднее значение R_c , определенное при испытаниях образцов кубической (5—20 см) формы, то коэффициент запаса для каменной соли должен быть больше 1,5—2.

Действительно, проверка целиков рудника им. 23 августа показала, что для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй $n \geq 3,56$ — в случае применения варианта камерно-столбовой системы с короткими столбами (наиболее распространенного в РНР) и $n \geq 6,3$ — в случае применения варианта камерно-столбовой системы со столбами в виде «стен».

Итак, формулы Г. де Ля Гупиера дают удовлетворительные результаты при условии выбора R_c с учетом геометрической формы столбов и физико-механических свойств породы, а также правильном определении коэффициента запаса n .

Для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй среднее значение $R_c = 340 \text{ кг/см}^2$ при $n = 4-5$, а не 1,5—2, как рекомендует автор для варианта с короткими столбами.

Приняв эти значения R_c и n и положив длину столбов $p' = 75 \text{ м}$, получим для предельного случая по формуле (14) $p = 18 \text{ м}$ при $n = 4$, $p = 26,4 \text{ м}$ при $n = 5$.

Таким образом, необходимая ширина целиков равна 20—25 м.

Метод М. Грюнера

Проверочная формула М. Грюнера

$$\frac{s}{S} \geq \frac{\gamma H}{R}$$

приводит к тем же результатам, что и формулы (12) и (14).

Метод Г. Бёргера

Формула Г. Бёргера дает

$$p = \frac{ab}{\left(\frac{940}{h} - 1\right)(a+b)} + 0,54 f = \frac{45 \cdot 75}{\left(\frac{940}{60} - 1\right)(45+75)} + 0,54 \cdot 50 = 29 \text{ м}.$$

Здесь

$a = 45 \text{ м}$ — ширина камеры;

$b = 75 \text{ м}$ — длина камеры;

$h = 60$ м — глубина разработок;

$f = 50$ м — высота камеры;

p — ширина столба.

Результат свидетельствует о том, что ширина целиков на руднике им. 23 августа недостаточна. Однако, как было показано выше, получаемая по этой формуле ширина (29 м) завышена.

Метод Л. Д. Шевякова

Будем считать что на руднике им. 23 августа принят вариант камерно-столбовой системы со столбами в виде «стен» и применим формулу акад. Л. Д. Шевякова

$$x = \frac{A}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - 1}.$$

В нашем случае, входящие в формулу параметры принимают следующие значения: $A = 45$ м; $R_c = 3400$ т/м²; $n = 2,5 - 3$; $H = 60$ м; $h = 50$ м; $q = q_1 = 2,2$ т/м³.

При $n = 2,5$ $x = 5,3$; при $n = 3$ $x = 7$ м; при $n = 4$ $x = 10$ м и при $n = 5$ $x = 13,6$ м.

Для варианта с короткими столбами прямоугольного сечения применима формула (26)

$$x = \frac{\frac{A^2}{L} + A}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - 1}.$$

При $n = 2,5$ $x = 9$ м; при $n = 3$ $x = 10,7$ м; при $n = 4$ $x = 15,6$ м и при $n = 5$ $x = 21$ м.

Для нашего случая этот вариант наиболее близок к действительности.

Следовательно, при значениях R и n , предложенных ее автором, формула (26) дает неудовлетворительные результаты. Это объясняется тем, что R соответствует прочности обычных образцов кубической формы, а n слишком мал.

Для того чтобы формула (26) давала удовлетворительные результаты, необходимо:

а) Принимать для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй $n = 4,5 - 5,5$ вместо $2,5 - 3$; тогда для R можно брать средние значения, определенные при испытании обычных образцов кубической формы, $R_c = 340$ кг/см².

б) Определять R с учетом формы и размеров целиков, а также физико-механических свойств породы экстраполированием результатов лабораторных испытаний, тогда n будет значительно больше.

Как бы то ни было, R и n должны устанавливаться не произвольно, а на основании наблюдений и тщательных лабораторных исследований.

Первое решение проще, так как можно ограничиться лабораторными испытаниями кубиков небольших размеров (5—20 см).

Второе решение сложнее, так как необходимо установить экстраполяционную формулу с учетом того, что целики отличаются формой и размерами от лабораторных образцов.

В работе, представленной Академией наук СССР [8], акад. Л. Д. Шевяков рекомендует первое решение как удовлетворительное с точки зрения практики. В этом случае, как было показано выше, значения n должны тщательно определяться для каждой породы.

Для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй $n = 4,5 - 5,5$.

Рассчитанная по этому методу прочная ширина целиков рудника им. 23 августа равна также 20—25 м.

Метод М. М. Протодяконова

Расчеты ведутся по формуле (48)

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma_0 a H}{f}},$$

где все размеры даются в тоннах и метрах.

Для рудника им. 23 августа входящие в формулу параметры принимают значения: $\gamma_0 = 2,2 \text{ т/м}^3$; $a = 22,5 \text{ м}$; $H = 60 \text{ м}$ и

$$f = \frac{1}{100} R_c = \frac{340}{100} = 3,4.$$

После подстановки получим

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{2,2 \cdot 22,5 \cdot 60}{3,4}} = 19 \text{ м}.$$

Полученный результат говорит о том, что ширина столбов недостаточна (15 м вместо минимум 19 м), что соответствует действительности. Формула (48) оказалась пригодной, потому что глубина разработок на руднике им. 23 августа мала (110 м).

Таким образом, и по методу М. М. Протодяконова получается, что ширина 20—25 м достаточна с точки зрения прочности целиков.

Метод В. Д. Слесарева

Ширина столба определяется из условия $T \leq s$, где в нашем случае (связная порода), согласно формуле (54),

$$s = \frac{2HR_1}{2\gamma_0 a}.$$

Для рудника им. 23 августа входящие в формулу параметры принимают значения: $H = 60 \text{ м}$; $R_1 = 180 \text{ т/м}^2$; $\gamma_0 = 2,2 \text{ т/м}^3$ и $a = 22,5 \text{ м}$, подставляя которые, получаем

$$s = \frac{2 \cdot 60 \cdot 180}{2 \cdot 2,2 \cdot 22,5} = \frac{21600}{99} = 218 \text{ м}.$$

Если же принять R_1 равным минимальному значению, полученному при лабораторных испытаниях ($R_1 = 7,7 \text{ кг/см}^2 = 77 \text{ т/м}^2$), получим

$$s = \frac{9240}{99} = 93 \text{ м.}$$

Таким образом, $T \leq 93 \text{ м.}$ Как и следовало ожидать, размеры целиков значительно завышены. В рассматриваемом случае можно лишь заключить, что размеры недостаточны ($15 \text{ м} < 93 \text{ м}$), но для определения рациональных размеров столбов формула непригодна.

Для использования в практических целях ее необходимо исправить, заменив прочность на растяжение R_1 допускаемым напряжением на растяжение $\frac{R_1}{n}$.

Для рудника им. 23 августа следует принять $n = 9 - 10$ (коэффициент запаса при растяжении отличается от такового при сжатии).

Тогда определенная по формуле (54) ширина целиков $a = 22 - 24 \text{ м}$, что согласуется с расчетами по предыдущим методам.

Метод П. М. Цимбаревича

Ширина целика определяется из зависимости (59): $B < 2,5 a = 2,5 \cdot 45 = 112,5 \text{ м}$. Этот результат говорит лишь о том, что ширина целиков на руднике им. 23 августа недостаточна.

Применив дополнительно формулу (60)

$$\sigma_1 = \left[k + m(k-1) \left(1 - \frac{B}{2,5a} \right) \right] \gamma Z \leq [R_2],$$

где параметры принимают значения: $k = 1,30$ (приблизительно, не по табл. 3, а по аналогии с прямоугольным сечением с отношением высоты к ширине $50 : 45 \cong 1 : 1$); $m = 0,5$ ($k-1 = 0,5(1,30-1) = 0,15$); $B = 15 \text{ м}$; $a = 45 \text{ м}$; $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$; $Z = 60 + 50 = 110 \text{ м}$ до почвы и $Z = 60 \text{ м}$ до кровли камеры; $R_2 = 340 \text{ кг/см}^2 = 3400 \text{ т/м}^2$, получим

$$\sigma_1 = \left[1,30 + 0,15(1,30 - 1) \left(1 - \frac{15}{2,5 \cdot 45} \right) \right] 2,2 \cdot 110 \leq 3400,$$

т. е. $\sigma_1 = 324 \text{ т/м}^2 < 3400 \text{ т/м}^2$ в нижней части и $\sigma_1 = 186 \text{ т/м}^2 < 3400 \text{ т/м}^2$ в верхней части столба.

Получается, что напряжения в столбах ниже допускаемых, т. е. столбы должны выдержать нагрузку, что противоречит действительности.

Для приведенных выше значений параметров формулу (60) можно записать еще следующим образом:

$$\sigma_1 = \left[1,30 + 0,15(1,30 - 1) \left(1 - \frac{B}{2,5 \cdot 45} \right) \right] 2,2 \cdot 110 \leq \frac{R_2}{n} = \frac{3400}{n},$$

или

$$325,5 - \frac{10,9}{112,5} B \leq \frac{R_2}{n} = \frac{3400}{n}.$$

При $B = 0$ коэффициент запаса

$$n = \frac{3400}{325,5} = 10,5.$$

Приняв $n = 11$, получим

$$325,5 - \frac{10,9}{112,5} B \leq 309,$$

откуда $B \geq 168,7$.

Это выражение верно при ширине столбов, большей 168,7 м.

Этот пример показывает, что метод П. М. Цимбаревича не применим для расчета целиков на соляных рудниках, что, впрочем, было отмечено и выше.

Метод С. С. Давыдова

Для ширины выработок, принятой на руднике им. 23 августа, расчетная формула С. С. Давыдова совпадает с формулой М. М. Протодьяконова

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma_a H}{f}}.$$

Выше было показано, что эта формула дает неудовлетворительные результаты, особенно при большой глубине разработок. В нашем случае рассчитанная по этой формуле ширина целика $T > 19$ м соответствует действительности, однако должна быть уточнена с помощью других методов.

Метод К. Кегеля

Подставив в формулы (4), (30), (31) значения параметров для рудника им. 23 августа $c = 200$ кг/см²; $b = 2,2$; $d = 1500$ см; $h = 5000$ см; $t = 1,5$; $sp = 2,2$ т/м³; $M = 60$ и $\cos \alpha = 1$, получим:

$$K_d = (200 + 2,2 \cdot 1500) \sqrt{\frac{1500}{5000}} = 1925 \text{ кг/см}^2;$$

$$\gamma_p = \frac{1,5 \cdot 2,2 \cdot 60 \cdot 1}{10(200 + 2,2 \cdot 1500) \sqrt{\frac{1500}{5000}}} = 0,0103, \text{ или } 1,03\%;$$

$$K_d = 1925 \text{ кг/см}^2 > D = \frac{60 \cdot 2,2 \cdot 1}{10 \cdot 0,0103} = 1281 \text{ кг/см}^2.$$

Так как последняя зависимость удовлетворяется, размеры целиков достаточны, что противоречит действительности.

Фактическое значение отношения

$$\gamma_\phi = \frac{s}{S} = 0,122,$$

а расчетное

$$\frac{s}{S} = 0,0068 \text{ при } t = 1 \text{ и } \frac{s}{S} = 0,0103 \text{ при } t = 1,5.$$

Так как опорные целики были разрушены даже при $\gamma_{\phi} = 0,122 > 0,0068$ и соответственно 0,0103, их размеры были недостаточны.

Для того чтобы целики выдержали нагрузку, необходимо получить из формулы (30) $\gamma_p > \gamma_{\phi} = 0,122$.

Такой результат был бы получен при

$$t > \frac{10 \gamma K_d}{sp M \cos \alpha} = \frac{10 \cdot 0,122}{2,2 \cdot 60 \cdot 1} = 17,8 \sim 18.$$

Следовательно, для того чтобы формулы Кегеля давали удовлетворительные результаты, необходимо придавать t значительно большие значения, нежели рекомендовал автор [30].

Метод проверки М. Стаматиу

Для проверочного расчета служит формула (38)

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n \gamma H}{R_c},$$

где R_c — прочность породы на сжатие при данных l и h .

Для столбов призматической формы с квадратным основанием

$$R_c = (r_c + k \sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}}.$$

Для рудника им. 23 августа входящие в эти формулы параметры имеют значения: $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$; $H = 60 \text{ м}$; $r_c = 174 \text{ кг/см}^2$; $k = 49,25$; $l = 1500 \text{ см}$; $h = 5000 \text{ см}$.

Подставляя эти значения, получим

$$R_c = (174 + 49,25 \sqrt{1500}) \sqrt{\frac{1500}{5000}} = (174 + 1906) \cdot 0,547 \approx 1140 \text{ кг/см}^2.$$

Учитывая, что на руднике им. 23 августа $\frac{s}{S} = \frac{3 \cdot 75 \cdot 15}{120 \cdot 230} = \frac{3375}{27600} = 0,122$, и предположив, что прочность на сжатие целиков с прямоугольным основанием близка по величине к прочности целиков той же ширины и высоты с квадратным основанием, определим из формулы (38) коэффициент запаса n для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n \gamma H}{R_c} = \frac{n \cdot 2,2 \cdot 60}{11400} = 0,122;$$

$$n = 10,5.$$

Прочность целиков рудника им. 23 августа была бы обеспечена, если бы $\frac{s}{S}_{\text{расч}} > \frac{s}{S}_{\text{действ}} = 0,122$, т. е. при $n > 10,5$.

Если вместо упрощенного выражения (38) исходить из общей формулы (36), получим

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n \gamma H}{R_c - n \gamma h},$$

где приняты прежние обозначения.

При $R_c = 340 \text{ кг/см}^2$ (среднем значении прочности на сжатие каменной соли месторождения Окна Мурешулуй, полученном при испытании кубиков), $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$, $H = 60 \text{ м}$ и $h = 50 \text{ м}$ получим

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n' \gamma H}{R_c - n' \gamma h} = 0,122,$$

а

$$n' \geq \frac{0,122 R_c}{\gamma H + 0,122 \gamma h} = \frac{415}{145,42} = 2,8.$$

Аналогично, при $R_c = 1140 \text{ кг/см}^2$ и прочих равных условиях, $n > 9,6$.

Принимаем для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй: при $R_c = 340 \text{ кг/см}^2$, $n' = 3-4$, $n'_{\text{ср}} = 3,5$;

при $R_c = (r_c + k \sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}}$, $n = 10-20$, $n_{\text{ср}} = 15$.

Принимая эти значения коэффициента запаса n и n' , получим при прочих равных условиях и $l = 20$:

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n' \gamma H}{R_c - n' \gamma h} = \frac{3,5 \cdot 2,2 \cdot 60}{3400 - 3,5 \cdot 2,2 \cdot 50} = 0,154,$$

при $R_c = 340 \text{ кг/см}^2$;

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n \gamma H}{R_c - n \gamma h} = \frac{15 \cdot 2,2 \cdot 60}{11400 - 15 \cdot 2,2 \cdot 50} = 0,203,$$

$$\text{при } R_c = (r + k \sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}} = 1140 \text{ кг/см}^2.$$

Для этих значений коэффициента запаса:

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = 0,154 \text{ соответственно } 0,203 > \frac{s}{S} \text{ действ} = 0,122.$$

Если использовать формулу (38),

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n' \gamma H}{R_c} = \frac{3,5 \cdot 2,2 \cdot 60}{3400} = 0,136, \text{ при } R_c = 340 \text{ кг/см}^2;$$

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n \gamma H}{R_c} = \frac{15 \cdot 2,2 \cdot 60}{11400} = 0,174, \text{ при } R_c = 1140 \text{ кг/см}^2.$$

И в этом случае условие прочности выполняется

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = 0,174 \text{ соответственно } 0,136 > \frac{s}{S} \text{ действ} = 0,122.$$

Таким образом, ширина 20 м является достаточной, что хорошо согласуется с расчетами по другим методам.

Метод К. В. Руппенейта

Считая столбы рудника им. 23 августа длинными — длина 75 м при ширине 15 м и узкими (отношение ширины к высоте $\alpha = \frac{15}{75} < 1$), определяем разрушающую нагрузку по формуле (65)

$$P_r = 4 a K' \left(\arctg \alpha + \frac{1}{\alpha} \sin^2 \varphi_0 \right) - 2 a H,$$

где $a = 7,5 \text{ м}$ — полуширина столба;

$$K' = \frac{H - K \operatorname{ctg} \rho}{\frac{\pi}{2} - \rho - \operatorname{ctg} \rho},$$

$H = R_t = 18 \text{ кг/см}^2$ — среднее значение предела прочности растяжению каменной соли месторождения Окна Мурешулуй;

$K = R_t = 28 \text{ кг/см}^2$ — среднее значение предела прочности срезу каменной соли месторождения Окна Мурешулуй, определенного лабораторными испытаниями призматических образцов $20 \times 12 \times 8 \text{ см}$ при расстоянии между зажимами $l = 15 \text{ см}$;

$\rho = 60^\circ$ — угол внутреннего трения каменной соли по Бёргеру [15];*

$$\psi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} = 45^\circ - 30^\circ = 15^\circ;$$

$$\alpha = \frac{15}{50} \cong 0,3.$$

Тогда:

$$K' = \frac{18 - 28 \operatorname{ctg} 60^\circ}{\frac{3,14}{2} - \frac{2 \cdot 3,14}{6} - \operatorname{ctg} 60^\circ} = \frac{18 - 28 \cdot 0,577}{1,57 - 1,047 - 0,577} = \frac{1,844}{-0,054} = -34 \text{ кг/см}^2$$

(знак минус означает сжатие);

$$P_r = 4 \cdot 7,5 \cdot 340 \left(\operatorname{arctg} 0,3 + \frac{1}{0,3} \sin^2 \psi_0 \right) - 2 \cdot 7,5 \cdot 180,$$

где $\operatorname{arctg} 0,3 = 16^\circ 45' = 0,292$ и $\sin^2 \psi_0 = \sin^2 15^\circ = 0,067$.

Следовательно,

$$P_r = 4 \cdot 7,5 \cdot 340 (0,292 + 0,223) - 2 \cdot 7,5 \cdot 180 = 5253 - 2700 = 2553 \text{ т.}$$

Что же касается нагрузки на 1 пог. м столба, то, как указывалось выше,

P = вес породы, приходящейся на 1 пог. м целика, + вес 1 пог. м

$$\text{целика} = \left(\frac{L}{2} + l + \frac{L}{2} \right) h l \gamma_a + l h' \cdot 1 \cdot \gamma_a =$$

$$= 60 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 2,2 + 15 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 2,2 = 9750 \text{ т.}$$

* Принятое в расчете значение угла внутреннего трения $\rho = 60^\circ$ неверно и получается, если угол трения вычислять как угол наклона прямой, касающейся одновременно кругов одноосного растяжения и сжатия. Для каменной соли $\rho \approx 20^\circ$, поэтому $\psi_0 = 25^\circ$ и

$$K' = \frac{18 - 28 \cdot 2,747}{\frac{3,14}{2} - 0,349 - 2,747} = 39 \text{ кг/см}^2$$

величина существенно положительная и полученный М. Стаматиу знак минус показывает на неблагоприятное с исходными данными.

Разрушающая нагрузка получается равной

$$P_r = 4 \times 7,5 \times 390 \left(0,292 + \frac{1}{0,3} 0,423^2 \right) - 2700 = 9900 \text{ т.}$$

Действующая на целик нагрузка примерно равна разрушающей, а не превосходит ее в 3,75 раза, как было получено М. Стаматиу. Однако вывод, что целик должен быть разгружен, остается справедливым, так как $n \approx 1$ соответствует вероятность разрушения, равная 50%. (Прим. ред.)

Здесь

$L = 45$ м — ширина камер, ограничивающих целик;

$l = 15$ м — ширина столба;

$h = 60$ м — глубина от дневной поверхности до кровли камер;

$h' = 50$ м — высота столба;

$\gamma_a = 2,2$ т/м³ — объемный вес каменной соли.

Так как $P_r = 2553$ т < $P = 9570$ т, фактическая нагрузка на целик больше разрушающей приблизительно в 3,75 раза.

Этот пример свидетельствует о том, что метод К. В. Руппенейта дает хорошие результаты.

Метод расчета М. Стаматиу

Применив формулу (54 д)

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} \cdot H^2 + 0,536) h$$

при $H = 110$ м и $h = 50$ м, получим

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} \cdot 110^2 + 0,536) 50 = 27 \text{ м},$$

что согласуется с результатами расчетов по другим методам.

Рудник «Старая Молдавия»

Метод Турнера

Так как отношение $\frac{S}{H}$ велико (разработка ведется на небольших глубинах)

$$\frac{S}{H} = \frac{25\,000}{65} = 385,$$

отношение $\frac{H}{L} = \frac{65}{145}$ или $\frac{65}{172}$ также меньше единицы, проверку производим по формуле (12).

Для рудника «Старая Молдавия» входящие в эту формулу параметры имеют значения: $\varphi = 3000$ т/м²; $\delta = 2,2$ т/м³; $H = 65$ м; $S = 25\,000$ м²; $s = 3800$ м²;

$$\frac{S}{s} = \frac{25\,000}{3800} = 6,6; \quad \frac{1}{k} = \frac{s}{S} = \frac{3800}{25\,000} = 0,152.$$

Подставляя эти значения в формулу (12), получим

$$\frac{\varphi}{k} = \frac{3000}{6,6} = 454,5 \text{ т/м}^2 > \delta H = 2,2 \cdot 65 = 143 \text{ т/м}^2.$$

Так как проверочная зависимость удовлетворена, размеры целиков должны оказаться прочными.

Приняв в формуле (12) $k = \frac{S}{s}$, получим

$$\frac{s}{S} \text{ расч} \geq \frac{\delta H}{\varphi} = \frac{2,2 \cdot 65}{3000} = 0,048, \text{ или } 4,8\%.$$

Так как

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = 0,152, \text{ или } 15,2\%,$$

то размеры целика больше необходимых.

Если обозначить через x ширину, которую должен иметь столб при длине 73 м, для того чтобы было удовлетворено условие (12), получим

$$s = 73x; \quad S = 172[145 - (52 - x)],$$

где 172 м и 145 м — длина и ширина площади разработок, соответствующей столбу длиной 73 и шириной 52 м.

Получаем

$$\frac{s}{S} = \frac{73x}{172(93+x)} = 0,048,$$

откуда $x \cong 12$ м.

При длине целика 73 м и ширине ограничивающих его камер 28, 37, 36 и 37 м такая ширина недостаточна, что подтверждается опытом рудника им. 23 августа.

Действительно, как указывалось выше, на этом руднике был разрушен столб шириной 15 м. Отсюда следует, что ширина центрального целика рудника «Старая Молдавия» должна быть больше 12 м. Но какой она должна быть на самом деле с помощью формулы (12), являющейся проверочной, а не расчетной, определить нельзя.

Метод Г. де Ля Гупиера

Применив формулу (14) и подставив в нее значения параметров; $p = 52$ м; $p' = 73$ м; $g = 28$ м; $g' = 36$ м; $H = 65$ м; $\Delta = 2200$ кг/м³; $h = 83$ м; $\delta = 2200$ кг/м³; $R = 300$ кг/см², получим

$$(52 + 28)(73 + 36)65 \cdot 2200 + 52 \cdot 73 \cdot 83 \cdot 2200 \leq \\ \leq 10\,000 \frac{300}{n'} \cdot 52 \cdot 73 \cdot 1 \cdot 940 \cdot 109 \cdot 600 \leq \frac{11 \cdot 388\,000\,000}{n'}.$$

Это неравенство имеет место при $n' \leq 5,87$.

Следовательно, запас прочности столба равен $n' = 5,87$.

Задаваясь различными значениями n' при длине столба $p' = 73$ м, получим для предельного случая, используя формулу (14):

при $n' = 1$	$p \cong 2,3$ м	$R_{с. доп} = 300$ кг/см ² ;
» $n' = 2$	$p \cong 5,45$ »	$R_{с. доп} = 150$ »
» $n' = 3$	$p \cong 10,0$ »	$R_{с. доп} = 100$ »
» $n' = 3,5$	$p \cong 13,0$ »	$R_{с. доп} = 86$ »
» $n' = 4$	$p \cong 17,5$ »	$R_{с. доп} = 75$ »
» $n' = 4,5$	$p \cong 22,0$ »	$R_{с. доп} = 66$ »
» $n' = 5$	$p \cong 29,3$ »	$R_{с. доп} = 60$ »

Так как за 85 лет работы рудника «Старая Молдавия» его центральный целик всегда находился в хорошем состоянии, для расчета целиков на месторождении Тыргу Окна можно принимать $n = 4-5$.

При $n < 4$ ширина столбов получается меньше 15 м, что недостаточно, как показал опыт рудников (длина столбов почти одинакова: 75 м на руднике им. 23 августа и 73 м на руднике «Старая Молдавия»).

При этих коэффициентах запаса получаем по формуле (14) следующие площади центрального целика:

$$\text{при } n' = 4 \quad p = 17,5 \text{ м} \quad s = 17,5 \cdot 73 = 1288 \text{ м}^2;$$

$$\text{» } n' = 4,5 \quad p = 22 \text{ м} \quad s = 22 \cdot 73 = 1606 \text{ м}^2;$$

$$\text{» } n' = 5 \quad p = 29,3 \text{ м} \quad s = 29,3 \cdot 73 = 2149 \text{ м}^2.$$

Это значит, что фактически площадь центрального целика рудника «Старая Молдавия» больше минимально необходимой:

$$\text{при } n' = 4 \text{ имеем } s_{\text{расч}} = 1288 \text{ м}^2 \text{ и } s_{\text{действ}} = 3800 \text{ м}^2;$$

$$\frac{s_{\text{действ}}}{s_{\text{расч}}} = \frac{3800}{1288} = 3 \text{ раза};$$

$$\text{при } n' = 4,5 \text{ имеем } s_{\text{расч}} = 1606 \text{ м}^2 \text{ и } s_{\text{действ}} = 3800 \text{ м}^2;$$

$$\frac{s_{\text{действ}}}{s_{\text{расч}}} = \frac{3800}{1606} = 2,36 \text{ раза};$$

$$\text{при } n' = 5 \text{ имеем } s_{\text{расч}} = 2149 \text{ м}^2 \text{ и } s_{\text{действ}} = 3800 \text{ м}^2;$$

$$\frac{s_{\text{действ}}}{s_{\text{расч}}} = \frac{3800}{2149} = 1,77 \text{ раза}.$$

При длине целика 73 м, высоте 83 м, ширине ограничивающих камер 28—36 м ширина целика 25—30 м, что соответствует отношению $\frac{p}{h} = \frac{30}{83} = 0,36$, обеспечила бы запас прочности $n' = 4,8—5$.

Метод Л. Д. Шевякова

Ширину центрального целика прямоугольного сечения, ограниченного камерами различной ширины, можно определить по формуле

$$x = \frac{A + \frac{AB}{L}}{\frac{R}{nHq} - \frac{hq_1}{Hq} - \frac{B}{L} - 1} = \frac{A + \frac{AB}{L}}{\frac{S}{s} - \frac{B}{L} - 1}.$$

Значения параметров, входящих в эту формулу, для рудника «Старая Молдавия» будут:

$$A = 36 \text{ м}; \quad B = \frac{28 + 36}{2} = 32 \text{ м}; \quad L = 73 \text{ м};$$

$$R = 3000 \text{ т/м}^2; \quad H = 65 \text{ м}; \quad q = 2,2 \text{ т/м}^3; \quad h = 83 \text{ м};$$

$$q_1 = 2,2 \text{ т/м}^3.$$

Подставляя эти значения в формулу, получим:

при $n' = 2$	$x \cong 6,6 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 150 \text{ кг/см}^2$;
» $n' = 3$	$x \cong 12,0 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 100 \text{ кг/см}^2$;
» $n' = 3,5$	$x \cong 15,8 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 86 \text{ кг/см}^2$;
» $n' = 4$	$x \cong 20,3 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 75 \text{ кг/см}^2$;
» $n' = 4,5$	$x \cong 26,7 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 67 \text{ кг/см}^2$;
» $n' = 5$	$x \cong 35,0 \text{ м}$	$R_{с. \text{ доп}} = 60 \text{ кг/см}^2$.

Принимая во внимание опыт рудника им. 23 августа, на котором был разрушен целик шириной 15 м при высоте 50 м и длине 75 м (в нашем случае длина равна 73 м), приходим к выводу, что центральный целик рудника «Старая Молдавия» (длиной 73 м и высотой 83 м) должен быть рассчитан с запасом прочности $n' = 4,5 \div 5$, которому соответствует ширина целика, равная $27 \div 35 \text{ м}$.

Зная коэффициент запаса и фактическую площадь центрального целика, можно определить, во сколько раз эта площадь больше минимально необходимой:

при $n' = 4$	$x \cong 20 \text{ м}$	$s = 20 \cdot 73 = 1460 \text{ м}^2$	и $\frac{3800}{1460} = 2 \text{ раза}$;
» $n' = 4,5$	$x = 26,7$	$s = 26,7 \cdot 73 = 1949$	и $\frac{3000}{1949} = 1,9 \text{ раза}$;
» $n' = 5$,	$x = 35$	$s = 35 \cdot 73 = 2555$	и $\frac{3800}{2555} = 1,5 \text{ раза}$.

Следовательно, фактический запас прочности центрального целика рудника «Старая Молдавия» равен 1,5—1,9.

И в этом случае ширина в 25—30 м обеспечила бы коэффициент запаса $n' = 4,8$.

Метод М. М. Протоद्याконова

Для рудника «Старая Молдавия» значения параметров, входящих в формулу (48-бис), будут: $\gamma_0 = 2,2 \text{ т/м}^3$; $a = 14$; 17; 18 и 18,5 м; $H = 65 \text{ м}$;

$$f = \frac{1}{100} R_c = \frac{300}{100} = 3.$$

Подставляя эти значения в формулу (48-бис), получим при $a = 14$; 17; 18 и 18,5 м соответственно $T \geq 17$; 18,5; 18,8 и 19,3 м.

Опыт рудника им. 23 августа свидетельствует о том, что ширина столба должна быть больше 20 м.

Результаты расчетов по формуле (48-бис) показывают, что размеры центрального целика рудника «Старая Молдавия» больше необходимых, но насколько больше, установить с помощью этой формулы нельзя.

Ширина 25—30 м, удовлетворяет зависимости (48-бис), что лишний раз подтверждает правильность предыдущих расчетов.

Так как ограничивающие целик камеры не одинаковы по ширине, расчет ведем по формуле (49)

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma a H}{f}},$$

где

$$\sqrt{a} = \frac{1}{2}(\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}).$$

Значения параметров, входящих в эту формулу, будут:
 $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$; $a_1 = 14 \text{ м}$; $a_2 = 18 \text{ м}$; $H = 65 \text{ м}$;

$$f = \frac{R_c}{100} = \frac{300}{100} = 3.$$

Следовательно,

$$\sqrt{a} = \frac{1}{2}(\sqrt{14} + \sqrt{18}) = \frac{1}{2}(3,74 + 4,24) \cong 4 \text{ и } a \cong 16 \text{ м};$$

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{2,2 \cdot 16 \cdot 65}{3}} \cong 18 \text{ м.}$$

Таким образом, ширина 25÷30 м удовлетворяет условию прочности (49).

Кроме того, необходимо проверить, не превышают ли напряжения в целике допускаемых по формулам (51) и (52). Так как целик ограничен камерами одинаковой высоты, эти формулы записываются в виде

$$\sigma' = \sigma + m\sigma \left(1 - \frac{T}{S}\right) \leq [R_2^*],$$

где $m = 0,5 (k - 1)$; $S = 5a$ и $\sigma = (k - 1) \gamma H$.

В нашем случае $k = 1,15$ (интерполировано приблизительно по данным табл. 3 для отношения высоты к ширине $83:36 \cong 2:1$); $n = 0,5 (k - 1) = 0,5 (1,15 - 1) = 0,075$; $a = 16 \text{ м}$; $S = 5a = 80 \text{ м}$; $T = 18 \text{ м}$; $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$; $H = 65 + 83 = 148 \text{ м}$; $\sigma = (1,15 - 1) 2,2 \cdot 148 = 49 \text{ т/м}^2$.

Подставляя эти значения, получим

$$\sigma' = 49 + 0,075 \cdot 49 \left(1 - \frac{18}{80}\right) = 52 \text{ т/м}^2.$$

Для каменной соли месторождения Тыргу Окна $R_2^* = 300 \text{ кг/см}^2 = 3000 \text{ т/м}^2$.

При коэффициенте запаса $n = 4$ находим

$$\frac{R_2^*}{n} = \frac{3000}{4} = 750 \text{ т/м}^2.$$

Условие $\sigma' = 52 \text{ т/м}^2 < R_2^* = 750 \text{ т/м}^2$ соблюдено, что означает, что ширина целика в 18 м достаточна.

Следовательно, размеры центрального целика рудника «Старая Молдавия» больше необходимых.

Метод К. Кегеля

Проверочные формулы выглядят в данном случае следующим образом:

$$K_d = (b + cd) \sqrt{\frac{d}{h}} = (200 + 2,2 \cdot 5200) \sqrt{\frac{5200}{8300}} = 9195 \text{ кг/см}^2;$$

$$\gamma = \frac{tspM \cos \alpha}{10K_d} = \frac{2,2 \cdot 65t}{10 \cdot 9195} = \frac{143t}{91950};$$

$$K_d > D = \frac{spM \cos \alpha}{10\gamma} = \frac{2,2 \cdot 65}{10\gamma} = \frac{143}{10\gamma}.$$

Так как $\gamma_{\text{действ}} = \frac{s}{S} = 0,152$, зависимостям (30) и (31) удовлетворяют значения коэффициента запаса

$$t \leq \frac{0,152 \cdot 91950}{143} = 97,5.$$

Если на основании предыдущих расчетов задаться шириной столба 25 м, получим:

$$K_d = (200 + 2,2 \cdot 2500) \sqrt{\frac{2500}{8300}} = 3124 \text{ кг/см}^2;$$

$$\gamma = \frac{2,2 \cdot 65 \cdot t}{10 \cdot 3124} = \frac{143t}{31240} = 0,09 \text{ при } \frac{s}{S} = \frac{73 \cdot 25}{118 \cdot 172};$$

$$t = \frac{0,09 \cdot 31240}{143} = \frac{2811,6}{143} = 19,6;$$

$$D = \frac{spM \cos \alpha}{10\gamma_c} = \frac{2,2 \cdot 65 \cdot 1}{10 \cdot 0,09} = \frac{143}{0,9} = 158 \text{ кг/см}^2.$$

Так как $K_d = 3124 \text{ кг/см}^2 > D = 158 \text{ кг/см}^2$, несущая способность столба больше фактической нагрузки на него ($t = 19,6$).

Следовательно, фактическая ширина столба 52 м больше необходимой.

Метод проверки М. Стаматиду

Проверка производится по формуле (36)

$$\frac{s}{S} \geq \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma H},$$

где для рудника «Старая Молдавия»

$$R_c = (r_c + k\sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}} = (174 + 49,25\sqrt{5200}) \sqrt{\frac{5200}{8300}} = 2939 \text{ кг/см}^2.$$

Этой зависимости удовлетворяет значение

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma H} < \frac{s}{S} \text{ действ} = 0,152, \text{ т. е. } n \leq \frac{4446}{171} = 26.$$

Если на основании расчетов по предыдущим методам принять ширину целика равной 25 м, получим:

$$\begin{aligned} R_c &= (r_c + k\sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}} = (174 + 49,25\sqrt{2500}) \sqrt{\frac{2500}{8300}} = \\ &= (174 + 2463) \cdot 0,548 = 1445 \text{ кг/см}^2; \end{aligned}$$

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma h} = \frac{2,2 \cdot 65n}{14\,450 - 2,2 \cdot 83n} = \frac{143n}{14\,450 - 182,6n},$$

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{73 \cdot 25}{118 \cdot 172} = 0,09;$$

$$\text{так как } \frac{s}{S} \text{ расч} \geq \frac{s}{S} \text{ действ, получаем } n \geq \frac{0,09 \cdot 14\,450}{159,43} = 8,1.$$

При $n = 10$

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma h} = \frac{10 \cdot 2,2 \cdot 65}{14\,450 - 10 \cdot 2,2 \cdot 83} = \frac{1430}{12\,624} = 0,113, \text{ а}$$

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{73x}{174[145 - (52 - x)]} = \frac{73x}{172(93 + x)}, \text{ откуда } x = 33,4 \text{ м.}$$

Следовательно, ширина 52 м больше необходимой, так как уже при ширине 25—30 м обеспечен запас прочности $n = 8$ —10.

Метод расчета М. Стаматия

По формуле (54 д)

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} H^2 + 0,536) h;$$

при $H = 65$ и $h = 83$ м получим

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} \cdot 65^2 + 0,536) 83 = 45 \text{ м,}$$

т. е. фактическая ширина 52 м больше необходимой.

Метод К. В. Руппенейта.

Хотя центральный целик рудника «Старая Молдавия» короткий (73 м $\times$ 52 м), при отношении ширины к высоте $\alpha = \frac{52}{83} = 0,626 < 1$, можно применить формулу (65)

$$P_r = 4aK' \left(\operatorname{arctg} \alpha + \frac{1}{\alpha} \sin^2 \psi_0 \right) - 2aH,$$

где $a = 26$ м; $H = R_t = 20$ кг/см²; $K = R_t = 30$ кг/см².

$$\rho = 60^\circ \text{ по Бёргеру [15]*; } \psi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} =$$

$$= 45^\circ - 30^\circ = 15^\circ; \quad \alpha = 0,626;$$

$$K' = \frac{H - K \operatorname{ctg} \rho}{\frac{\pi}{2} - \rho - \operatorname{ctg} \rho} = \frac{20 - 30 \cdot 0,577}{\frac{3,14}{2} - \frac{2 \cdot 3,14}{6} - 0,577} = -\frac{2,69}{0,054} = -50 \text{ кг/см}^2$$

(знак минус означает сжатие).

* Здесь также ошибочно принято значение $\rho = 60^\circ$, следует принять не более 20° , при этом $\psi_0 = 25^\circ$, $\alpha = 0,626$;

$$K' = \frac{20 - 30 \cdot 2,745}{1,571 - 0,349 - 2,745} \approx 40 \text{ кг/см}^2;$$

$$P_r = 4 \cdot 26 \cdot 400 \left(1,118 + \frac{1}{0,626} \cdot 0,423^2 \right) -$$

$$- 2 \cdot 26 \cdot 200 = 58\,500 - 10\,400 = 48\,100 \text{ т.}$$

Уточнение выкладок не изменяет качественного результата, что разрушающая нагрузка больше действующей, но коэффициент запаса снижается и будет $n = 2,2$.
(Прим. ред.)

Разрушающая нагрузка

$$P_r = 4 \cdot 26 \cdot 500 \left(\arctg 0,626 + \frac{1}{0,626} \sin^2 15^\circ \right) - 2 \cdot 26 \cdot 200 = \\ = 4 \cdot 26 \cdot 500 (1,118 + 0,107) - 2 \cdot 26 \cdot 200 = 63\,700 - 10\,400 = \\ = 53\,300 \text{ м};$$

$$\arctg 0,626 = 32^\circ 03' = 1,118 \text{ и } \sin^2 \phi_0 = \sin^2 15^\circ = 0,067.$$

Фактическая нагрузка

$$P = \left(\frac{L_1}{2} + l + \frac{L_2}{2} \right) H \cdot 1 \cdot \gamma_a + l \cdot 1 \cdot h' \gamma_a = \left(\frac{36}{2} + 52 + \frac{34}{2} \right) \cdot 65 \cdot 1 \times \\ \times 2,2 + 52 \cdot 1 \cdot 83 \cdot 2,2 = 87 \cdot 65 \cdot 1 \cdot 2,2 + 52 \cdot 1 \cdot 83 \cdot 2,2 = \\ = 12\,441 + 9\,495 = 21\,936 \text{ м},$$

где L_1 и L_2 — ширина ограничивающих целик камер;

h — ширина целика;

H — глубина от дневной поверхности до кровли камер;

h' — высота целика;

γ_a — объемный вес каменной соли.

Так как $P_r = 53\,300 \text{ м} > P = 21\,936 \text{ м}$, размеры целика больше
необходимых $\left(\frac{P_r}{P} = \frac{53\,300}{21\,936} = 2,4 \right)$.

Рудник «Новая Молдавия»

Рудник «Новая Молдавия» действующий. Мы проверим размеры его центрального целика в предположении, что камеры достигли проектной высоты 50 м. В настоящее время их высота равна 17 м. Для проверки используются формулы, давшие удовлетворительные результаты при расчете целиков на рудниках им. 23 августа месторождения Окна Мурешулуй и «Старая Молдавия» месторождения Тыргу Окна.

Метод Г. де Ля Гупиера

Подставляя значения параметров $p = 35 \text{ м}$; $p' = 64 \text{ м}$; $g = g' = 36 \text{ м}$; $H = 105 \text{ м}$; $\Delta = 2200 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 2200 \text{ кг/м}^3$; $h = 50 \text{ м}$; $R = 300 \text{ кг/см}^2$; $n' = 3-4$ в формулу (14), получим: $(35 + 36) (64 + 36) \cdot 105 \cdot 2200 + 35 \cdot 64 \cdot 50 \cdot 2200 \leq 10\,000 \frac{300}{n'} \cdot 35 \cdot 64$

или

$$1\,886\,500\,000 \leq \frac{6\,720\,000\,000}{n'}.$$

Это неравенство имеет место при $n' = 3,5$.

Следовательно, при данных размерах целика имеется запас прочности $n' = 3,5$.

Для предельного случая при длине целика 64 м и прочих равных условиях получаем по формуле (14)

$$30\,140\,000p + 831\,600\,000 = \frac{192\,000\,000}{n'}p;$$

при $n' = 3$ имеем $p \cong 24,5$ м и при $n' = 3,5$ — $p \cong 33,6$ м.

Принимая во внимание опыт рудника им. 23 августа, на котором целик шириной 15 м и длиной 75 м, ограниченный камерами шириной 45 м, был разрушен, заключаем, что при длине 64 м и ширине ограничивающих камер 36 м прочная ширина центрального целика рудника «Новая Молдавия» находится в пределах 24,5—33,6 м. Следовательно, фактическая ширина целика 35 м назначена правильно.

Отметим, что эта ширина больше ширины 25—30 м, рекомендованной нами для целика рудника «Старая Молдавия». Дело в том, что мощность покрывающей толщи равна 105 м на руднике «Новая Молдавия» и 65 м на руднике «Старая Молдавия». Следовательно, нагрузка на целик рудника «Новая Молдавия» больше и его размеры необходимо увеличить.

Метод Л. Д. Шевякова

Так как по проекту целик ограничен камерами одинаковой ширины (36 м), для расчета его ширины применима формула (26).

Подставляя значения параметров, входящих в формулу (26), $A = 36$ м; $L = 64$ м; $R = 3000$ т/м²; $n = 3 - 4$; $H = 105$ м; $q = q_1 = 2,2$ т/м³ и $h = 50$ м, получим:

$$\text{при } n = 3 \quad x \cong 24,5 \text{ м и } R_{\text{доп}} = 100 \text{ кг/см}^2$$

$$\text{» } n = 3,5 \quad x \cong 33,6 \text{ м и } R_{\text{доп}} = 85,5 \quad \text{»}$$

$$\text{» } n = 4 \quad x \cong 46,3 \text{ м и } R_{\text{доп}} = 75 \quad \text{»}$$

Следовательно, при ширине 35 м имеется запас прочности $n = 3,6$.

Рассчитанные по этой формуле размеры целика при $n = 3$ и $n = 3,5$ совпадают с полученными по методу Г. де Ля Гупиера.

По соображениям, аналогичным перечисленным выше, ширина 35 м достаточна.

Метод М. М. Протоद्याконова

Ширина целика определяется по формуле (48-бис)

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{\gamma_0 a H}{f}}.$$

Подставляя значения параметров для рудника «Новая Молдавия» $\gamma_0 = 2,2$ т/м³; $a = 18$ м; $H = 105$ м;

$$f = \frac{R_c}{100} = \frac{300}{100} = 3$$

в формулу (48-бис), получим

$$T \geq 0,65 \sqrt{\frac{2,2 \cdot 18 \cdot 105}{3}} \cong 24 \text{ м.}$$

Такую же минимальную ширину мы получили при расчете по некоторым другим методам при $n = 3$.

С точки зрения других методов расчета эта ширина недостаточна.

Фактическая ширина целика, равная 35 м, больше необходимой.

Метод К. Кегеля

Подставляя значение параметров в проверочные формулы (4), (30), (31), получим:

$$K_d = (b + cd) \sqrt{\frac{d}{h}} = (200 + 2,2 \cdot 3500) \sqrt{\frac{3500}{5000}} = 6604 \text{ кг/см}^2;$$

$$\gamma = \frac{tspM \cos \alpha}{10K_d} = \frac{2,2 \cdot 105t \cdot 1}{10 \cdot 6604} = \frac{s}{S} = \frac{35 \cdot 64}{107 \cdot 136} = 0,154;$$

$$t = \frac{0,154 \cdot 66040}{2,2 \cdot 105} = \frac{10170}{231} \approx 44;$$

$$K_d = 6604 \text{ кг/см}^2 > D = \frac{spM \cos \alpha}{10\gamma} = \frac{2,2 \cdot 105 \cdot 1}{10 \cdot 0,154} = 150 \text{ кг/см}^2.$$

Так как зависимость (31) удовлетворяется, целик способен противостоять нагрузке. Однако о том, насколько принятые размеры целика больше минимально необходимых, ничего сказать нельзя.

Метод проверки М. Стамату

Подставляя значения параметров, получим:

$$\begin{aligned} \gamma &= 2,2 \text{ т/м}^3; H = 105 \text{ м}; R_c = (r_c + k\sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}} = \\ &= (174 + 49,25\sqrt{3500}) \sqrt{\frac{3500}{5000}} \approx 2440 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

Значение коэффициента запаса n определяем так же, как это было сделано для рудника им. 23 августа по формуле (36)

$$\frac{s}{S} \text{ расч} \geq \frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma H} \leq \frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{35 \cdot 64}{107 \cdot 136} = 0,154.$$

Отсюда

$$\frac{n\gamma H}{R_c - n\gamma H} \leq 0,154 \text{ и}$$

$$n \leq \frac{0,154R_c}{\gamma H + 0,154\gamma h} = \frac{0,154 \cdot 24400}{2,2 \cdot 105 + 0,154 \cdot 2,2 \cdot 50} = \frac{3758}{248} \approx 15,1.$$

При $n = 15$ отношения

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{n\gamma H}{R_c} = \frac{15 \cdot 2,2 \cdot 105}{24400} = \frac{3465}{24400} = 0,142;$$

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{64x}{136[107 - (35 - x)]} = \frac{64x}{136(72 + x)},$$

если

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{s}{S} \text{ действ};$$

$$\frac{64x}{136(72+x)} = 0,142,$$

откуда

$$x = \frac{1390}{44,7} = 31 \text{ м.}$$

Значение $n = 15$ удовлетворяет зависимости (38), т. е. ширина 31 м, соответствующая этому коэффициенту запаса, достаточна.

Следовательно, фактическая ширина 35 м выбрана правильно.

Метод расчета М. Стаматиду

Применяя формулу (54д)

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} H^2 + 0,536) h,$$

при $H = 105 \text{ м}$ и $h = 50 \text{ м}$ получим

$$d_1 = (54 \cdot 10^{-8} \cdot 105^2 + 0,536) \cdot 50 = 27 \text{ м.}$$

Ширина 27 м согласуется с результатами расчетов по другим методам. Фактическая ширина 35 м назначена правильно.

Метод К. В. Руппенейта

Хотя центральный целик рудника «Новая Молдавия» короткий ($64 \times 35 \text{ м}$), при заданном отношении ширины к высоте $\alpha = \frac{35}{50} = 0,7 < 1$, можно применить формулу (65)

$$P_r = 4aK' \left(\arctg \alpha + \frac{1}{\alpha} \sin^2 \psi_0 \right) - 2aH,$$

где

$$a = 17,5 \text{ м}; H = R_t = 20 \text{ кг/см}^2; K = R_t = 30 \text{ кг/см}^2;$$

$$\rho = 60^\circ \text{ по Бёргеру [15]*}; \psi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} = 45^\circ - 30^\circ = 15^\circ; \alpha = 0,7;$$

$$K' = \frac{H - K \operatorname{ctg} \rho}{\frac{\pi}{2} - \rho - \operatorname{ctg} \rho} = \frac{20 - 30 \cdot 0,577}{\frac{3,14}{2} - \frac{2 \cdot 3,14}{6} - 0,577} = -\frac{2,69}{0,054} = -50 \text{ кг/см}^2$$

(знак минус означает сжатие).

Подставляя эти значения в формулу (65), получим

$$\begin{aligned} P_r &= 4 \cdot 17,5 \cdot 500 \left(\arctg 0,7 + \frac{1}{0,7} \sin^2 15^\circ \right) - 2 \cdot 17,5 \cdot 200 = 35\,000 \times \\ &\times (0,610 + 0,096) - 7000 = 24\,710 - 7000 = 17\,710 \text{ т,} \\ &\text{где } \arctg 0,7 = 35^\circ = 0,610; \sin^2 \psi_0 = \sin^2 15^\circ = 0,067. \end{aligned}$$

* Следует принять $\rho = 20^\circ$, $K' \approx 400 \text{ т/м}^2$, $\psi_0 = 25^\circ$. Подсчет разрушающей нагрузки дает $P_r = 4 \cdot 17,5 \cdot 400 (0,610 + 0,256) - 2 \cdot 17,5 \cdot 200 = 24\,200 - 7000 = 17\,200 \text{ т. (Прим. ред.)}$.

Фактическая нагрузка на целик

$$P = \left(\frac{L_1}{2} + l + \frac{L_2}{2} \right) H \cdot 1 \cdot \gamma_a + l \cdot 1 \cdot h' \gamma_a,$$

где все обозначения прежние.

Так как $L_1 = L_2 = 36$ мм, $l = 35$ м, $H = 105$ м, $h' = 50$ м и $\gamma_a = 2,2$ т/м³, получим

$$P = 71 \cdot 105 \cdot 1 \cdot 2,2 + 35 \cdot 1 \cdot 50 \cdot 2,2 = 16\,401 + 3850 = 20\,251 \text{ т.}$$

Так как $P_r = 17\,710 \text{ т} < P = 20\,251 \text{ т}$, размеры целика недостаточны, т. е. он будет разрушен по достижении камерами проектной высоты (50 м). Этот результат противоречит полученным другими методами расчета.

Отсюда следует, что при проверке целиков действующих рудников, а также при проектировании необходимо сравнить результаты, полученные несколькими методами расчета: по крайней мере двумя при совпадении результатов и тремя при их расхождении.

Глава IV

РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦЕЛИКОВ

Ни на одном из рассмотренных рудников не были установлены реперы для определения фактических вертикальных деформаций целиков.

Ниже эти деформации рассчитаны по формулам акад. Л. Д. Шевакова.

Рудник им. 23 августа

Применим формулу (10) для целиков прямоугольного сечения $L \times x$, ограниченных камерами одинаковой ширины A ,

$$\Delta l = -q \frac{Hl}{E} \left[\frac{(A+x)(A+L)}{xL} + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1 h l}{2E} \cdot \frac{2\mu^2}{1-\mu}.$$

Значения параметров, входящих в эту формулу, для рудника им. 23 августа следующие:

$q = 0,0022$ кг/см³; $H = 6000$ см; $l = 3300$ см (высота от почвы до наклонных стен); $E = 25\,000$ кг/см²;

$A = 4500$ см; $x = 1500$ см; $L = 7500$ см; $\mu = \frac{1}{3} = 0,33$ (для каменной соли); $q_1 = 0,0022$ кг/см³; $h = 5000$ см.

Подставляя эти значения в формулу (10), получим

$$\begin{aligned} \Delta l &= 0,0022 \frac{6000 \cdot 3300}{25\,000} \left[\frac{(4500 + 1500)(4500 + 7500)}{1500 \cdot 7500} + \frac{2 \cdot 0,33^2}{1 - 0,33} - 1 \right] - \\ &- \frac{0,0022 \cdot 5000 \cdot 3300}{2 \cdot 25\,000} \cdot \frac{2 \cdot 0,33^2}{1 - 0,33} = -1,74(6,4 + 0,328 - 1) - 0,238 = \\ &= -10,2 \text{ см} \end{aligned}$$

(знак минус означает, что имеет место укорочение).

Относительное удлинение целиков

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 = \frac{10,2}{3300} = 0,31\%.$$

Как было показано выше, величина относительного укорочения находится за пределами малых (0,3 %) пластических деформаций на границе больших пластических деформаций.

Если вспомнить, что пластические деформации продолжают расти даже при постоянной нагрузке, станет ясным, что когда напряжения достигли величины

$$R_c = \frac{\gamma H}{s} = \frac{2,2 \cdot 60}{0,122} = 1100 \text{ т/м}^2 = 110 \text{ кг/см}^2,$$

превышающей допускаемую (по Г. де Ля Гупиеру и Л. Д. Шевякову)

$$R_{\text{доп}} = \frac{R_c}{n'} = \frac{340}{4} = 85 \text{ кг/см}^2$$

или 96 кг/см² (по Кегелю) и 76 кг/см² (по М. Стаматиу) целик рудника им. 23 августа растрескался и окончательно потерял несущую способность.

Все это говорит о том, что формула акад. Л. Д. Шевякова верна лишь в первом приближении; фактические деформации, вызвавшие разрушение целика, были значительно большими.

Это несоответствие объясняется следующими причинами:

а) формулы выведены для однородного изотропного упругого материала, в то время как каменная соль неоднородна и анизотропна; кроме того, на руднике им. 23 августа она находилась в пластическом, а не упругом состоянии;

б) модуль упругости E и коэффициент Пуассона каменной соли не являются постоянными величинами, а зависят от нагрузки;

в) напряжения в целиках распределены неравномерно.

«Рудник Старая Молдавия»

Так как ограничивающие целик камеры имеют неодинаковую ширину, для определения вертикальных деформаций применим формулу (11)

$$\Delta l = -\frac{qHl}{E} \left[\frac{(A+x)(B+L)}{xL} + \frac{2\mu^2}{1-\mu} - 1 \right] - \frac{q_1hl}{2E} \cdot \frac{2\mu^2}{1-\mu}.$$

Значения входящих в формулу (11) параметров следующие: $q = 0,0022 \text{ кг/см}^3$ (средний объемный вес каменной соли и покрывающих пород); $H = 6500 \text{ см}$; $l = 6800 \text{ см}$ (высота столба от почвы до наклонных стен); $E = 25\,000 \text{ кг/см}^2$; $A = 3600 \text{ см}$; $x = 5200 \text{ см}$; $B = \frac{28+36}{2} = 32 \text{ м} = 3200 \text{ см}$; $L = 7300 \text{ см}$; $\mu = \frac{1}{m} = \frac{1}{3} = 0,33$ (для каменной соли); $q_1 = 0,0022 \text{ кг/см}^3$; $h = 8300 \text{ см}$.

Подставляя эти значения, получим

$$\begin{aligned} \Delta l &= -0,0022 \frac{6500 \cdot 6800}{25\,000} \left[\frac{(3600 + 5200)(3200 + 7300)}{5200 \cdot 7300} + \frac{2 \cdot 0,33^2}{1 - 0,33} - 1 \right] - \\ &- \frac{0,0022 \cdot 8300 \cdot 6000}{2 \cdot 25\,000} \cdot \frac{2 \cdot 0,33^2}{1 - 0,33} = -3,894 (2,43 + 0,325 - 1) - \\ &- 0,806 = -6,834 - 0,806 = -7,64 \text{ см (укорочение)}. \end{aligned}$$

Относительное удлинение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 = \frac{7,64 \cdot 100}{6800} = 0,112\%.$$

Это означает, что соль находится в области малых пластических деформаций ($0,03\% < \varepsilon < 0,3\%$).

По этой причине, а также благодаря запасу прочности, за 85 лет работы центральный целик рудника «Старая Молдавия» не претерпел заметных деформаций. Имеющиеся в стенках сбойки, пройденные к стволу в верхней части целика, а также трещины в наклонных стенах камер указывают на то, что целик испытал некоторое упруго-пластическое укорочение без всяких, однако, вредных последствий.

Определенное расчетом укорочение должно и в этом случае рассматриваться как первое приближение. Фактическое укорочение больше.

Г л а в а V

О ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМОЙ

Теоретическую предельную глубину разработки камерно-столбовой системой можно определить с помощью общей формулы (40)

$$H_m (\text{теоретич}) = \frac{R_c + \gamma e - \gamma_1 (h + e)}{\gamma}$$

или упрощенных формул (42) и (43):

$$H_m (\text{теоретич}) = \frac{R_c}{\gamma} - h; \quad H_m (\text{теоретич}) = \frac{R_c}{\gamma}.$$

Из этих формул следует, что предельная глубина разработки H_m зависит главным образом от двух факторов — прочности породы целика на сжатие R_c и объемного веса вышележащих пород γ .

Так как эти факторы зависят от полезного ископаемого, приходим к выводу, что для каждого месторождения существует своя предельная глубина разработки.

Для румынской каменной соли при $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$ и $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$, формула (43) дает

$$H_m (\text{теоретич}) = \frac{R_c}{\gamma} = \frac{3250}{2,2} \cong 1480 \text{ м.}$$

Практически предельная глубина разработки значительно меньше, так как помимо условия прочности столбы должны удовлетворять условию минимальной деформации (см. часть I).

Для каменной соли условие прочности удовлетворено, если столбы рассчитаны с коэффициентом запаса $n = 4-5$ при R_c , определяемом лабораторными испытаниями кубиков размером 5—20 см. При этом условии предельная глубина разработки, на ко-

торой столбы не будут испытывать больших пластических деформаций, составит, согласно формуле (45),

$$H_{\text{т (практич)}} = \frac{R_c}{n \gamma} = \frac{3250}{4 \cdot 2,2} = 370 \text{ м.}$$

Мировая (в особенности немецкая) практика знает случаи разработки каменной соли на значительно больших глубинах.

На руднике Шенебек — Нидерзаксен (Schönebek — Niedersachsen) в ГДР [21] пройден ствол глубиной 920 м, обслуживающий эксплуатационные горизонты на глубинах 540, 600, 660, 780, 840 и 880 м. Штреки пройдены по соли.

Вместо прочности на сжатие, определенной испытаниями кубиков размерами 5—20 см, в формулу (45) можно ввести значения R_c , определенные экстраполированием по формуле (6), для принятых на больших глубинах размеров столбов (ширина $l = 20$ м и высота $h = 10$ м), обеспечивающих безопасность работ и приемлемый коэффициент эксплуатации

$$R_c = (123,5 + 59,3 \sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}} = (123,5 + 59,3 \sqrt{2000}) \sqrt{\frac{2000}{1000}} = 3911 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда при $n_{\text{ср}} = 15$ получим

$$H_{\text{max}} = \frac{R_c}{n \gamma} = \frac{39110}{15 \cdot 2,2} \cong 1185 \text{ м.}$$

Ниже будет показано, что с точки зрения безопасности работ разработка на такой глубине не рекомендуется.

Об условии минимальной деформации, которому должны удовлетворять целики, необходимо сказать следующее.

При одноосном сжатии кубики каменной соли испытывают следующие виды деформации:

Упругие деформации $\epsilon = 0 - 0,03\%$ при $\sigma = 0 - 25 \text{ кг/см}^2$;

Малые пластические деформации $\epsilon = 0,03\% - 0,3\%$ при $\sigma = 25 - 100 \text{ кг/см}^2$.

Большие пластические деформации $\epsilon > 0,3\%$ при $\sigma > 100 \text{ кг/см}^2$.

Средние сжимающие напряжения в центральной части целика с достаточной для практики точностью можно определить по формуле $\sigma = \gamma H \text{ т/м}^2$. Для каменной соли $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$, следовательно, $\sigma = 2,2 H \text{ т/м}^2$, откуда $H = \frac{\sigma}{2,2} \text{ м.}$

Подставляя в эту формулу приведенные выше величины напряжений, обнаружим, что в зависимости от глубины разработок опорные целики могут испытывать как упругие, так и пластические деформации, а именно:

упругие деформации — до глубины $H = \frac{250}{2,2} \cong 114 \text{ м;}$

малые пластические деформации — от глубины $H = \frac{250}{2,2} \cong 114 \text{ м}$ до глубины $H = \frac{1000}{2,2} \cong 456 \text{ м;}$

большие пластические деформации — при $H > 456 \text{ м.}$

Эти теоретические выводы были подтверждены опытами Буша [19], проводившимися на калийном руднике в Ней-Страйсфурте, на котором глубина ствола составляет 750 м, а нижний горизонт находится на глубине 735 м [40].

Пробував электросверлом на различной глубине шпурь диаметром 40 мм и глубиной 0,5 м и поместив в них хорошо пригнанные свинцовые трубы, этот исследователь установил, что на глубине 650—750 м свинцовые трубы уже через несколько дней были сильно зажаты и с трудом извлекались из шпуров, на глубине 400—500 м трубы зажимались лишь через несколько недель, а на глубине до 250 м трубы не зажимались вовсе, т. е. диаметр шпуров не уменьшался.

Явления пластических деформаций каменной соли, интенсивность которых растет с увеличением глубины, неоднократно наблюдались при проходке глубоких стволов и штреков, расположенных на большой глубине. Так, Г. Шпакелер [40] упоминает стволы V и II Еписхейм (Эльзас), где крепь испытала значительное давление, начиная с 680 м до 894 м (конечная глубина стволов); на этом участке стволы пришлось закрепить тубингами.

На руднике «Агата» ширина штрека 4,20 м, на гор. 735 м уменьшилась на 2—3 мм в течение нескольких недель и на 36—44 мм — за полгода.

На другом руднике, глубиной 800 м, пройденные на глубине 700—800 м штреки были так сильно сдавлены из-за пластических деформаций каменной соли, что только с большим трудом удалось сохранить их сечение [39].

На основании мирового опыта разработки каменной соли мы считаем, что предельная глубина, на которой обеспечена полная безопасность работ при разработке камерно-столбовой системой, равна приблизительно 1000 м. При больших глубинах разработка каменной соли обычным способом сопряжена со столь большими техническими трудностями (необходимость крепить выработки, опасность разрушения целиков и т. д.), что представляется экономически целесообразным перейти на разработку растворением с бурением скважин с поверхности или из подземных выработок.

Глава VI

О ВЫБОРЕ ВАРИАНТА КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ РАЗРАБОТОК

В работе [44] показано, что при камерно-столбовой системе ширина камер понизу и поверху не зависит от глубины разработок, а размеры опорных целиков зависят от мощности покрывающей толщи пород, т. е. от глубины разработок.

Эти утверждения верны только для однородного упругого массива. Для пластического или неоднородного массива, а также при

наличии геологических нарушений они не соответствуют действительности.

Имея в виду соляные разработки вообще и принимая во внимание вышеизложенное, можно высказать ряд соображений о выборе варианта камерно-столбовой системы.

1. **Глубина меньше 114 м.** На этих глубинах можно применять любой вариант камерно-столбовой системы как с нисходящим забоем и камерами трапецевидного, овального, прямоугольного и т. д. сечения, так и с восходящим забоем и камерами прямоугольного сечения.

Максимальная ширина камер поверху должна приниматься равной 25 м для камер прямоугольного сечения, 15 м — для камер трапецевидного сечения и 5 м — для камер параболически-овального сечения.

Ширина понизу камер трапецевидного сечения может достигать 45 м, овального сечения 60 м.

Как было показано в работе [44], в трапецевидных камерах стены должны быть наклонены под 60° , а контур овальных камер должен быть очерчен по параболе. Длина камер ограничивается только размерами залежи и требованиями эксплуатации.

Размеры опорных целиков должны быть правильно рассчитаны.

2. **Глубина 114—456 м.** Как указывалось выше, на этих глубинах опорные целики испытывают малые пластические деформации, увеличивающиеся во времени.

Деформация целиков может сопровождаться образованием трещин и вывалами, главным образом в наклонных стенах, а иногда и в верхних углах камер прямоугольного сечения при недостаточных размерах целиков.

Во избежание этих осложнений следует применять один из упомянутых выше вариантов при трапецевидном или прямоугольном сечении камер, если глубина не превышает 300 м, и прямоугольном, если глубина больше 300 м.

В случае трапецевидного сечения, потолку камер рекомендуется придать сводообразную форму, для того чтобы частично разгрузить периферийные участки опорных целиков.

Ширина камер поверху может приниматься равной 20 м при прямоугольном и 10 м при трапецевидном сечении, а ширина понизу — 20 м при прямоугольном и 35 м при трапецевидном сечении.

Эти размеры несколько меньше рекомендуемых в предыдущем пункте, так как на данных глубинах каменная соль находится в пластическом, а не в упругом режиме.

Угол наклона стен трапецевидных камер равен также 60° .

Длина камер ограничивается теми же условиями, а размеры целиков должны быть рассчитаны.

3. **Глубина превышает 456 м.** На глубине, превышающей 456 м, опорные целики испытывают с самого начала увеличивающиеся во времени большие пластические деформации, каков бы ни был их запас прочности.

Испытания образцов каменной соли различного качества [43] позволили автору настоящей книги сделать некоторые выводы, которые можно распространить и на опорные целики:

а) Предельное относительное укорочение образцов в виде призм с одинаковым основанием уменьшается с увеличением высоты образцов.

б) Предельное относительное укорочение кубиков возрастает с увеличением размеров их граней.

в) Предельное относительное укорочение образцов в виде призм одинаковой высоты растет с увеличением площади основания образца.

В этих опытах предельные относительные укорочения лежали в пределах 0,6—6%.

Эти же опыты показали, что вообще чем больше прочность образца, тем больше его предельное относительное удлинение.

По данным практики на глубинах, больших 456 м, отношение высоты столбов h к их ширине l составляет $0,5 < \frac{h}{l} < 1$.

При этом соотношении размеров предельное относительное укорочение равно 1—4%.

Столбы высотой 10—15 м должны укоротиться на 0,1—0,6 м.

По этим причинам на глубине, превышающей 456 м, но меньшей 1000 м, применимы только варианты камерно-столбовой системы с восстающим забоем и камерами прямоугольного сечения; толку камер должна быть придана сводообразная форма.

Ширину камер следует брать равной 10—15 м, т. е. меньше, чем в предыдущих случаях, в зависимости от физико-механических свойств соли и геологической характеристики залежи.

Во избежание несчастных случаев, вследствие обвалов стен, вызванных неизбежными пластическими деформациями, срок службы камер должен быть возможно короче. По окончании работ камеры можно оставлять пустыми или заложить полностью или частично, в зависимости от конкретных проявлений горного давления.

Глава VII

РАСЧЕТ ЦЕЛИКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАМЕННОЙ СОЛИ РАСТВОРЕНИЕМ В КАМЕРАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Общие сведения

При добыче соли растворением технологический процесс осуществляется в полостях цилиндрической формы с плоским, сводчатым или в виде подрезанного свода потолком, разделенных целиками, горизонтальное сечение которых, в отличие от ранее рассмотренных случаев, не является квадратом или прямоугольником.

При добыче растворением форма целиков зависит от взаимного расположения камер, их диаметра и расстояния между их вертикальными осями.

Если камеры расположены в шахматном порядке, сечение целика между четырьмя соседними камерами имеет форму квадрата или ромба, уменьшенного на величину площади одной круглой камеры (рис. 29).

Для расчета таких целиков формулы Г. де Ля Гупиера и акад. Л. Д. Шевякова не применимы, так как они выведены для целиков квадратного или прямоугольного сечения.

В настоящее время мы можем лишь проверить заранее заданные размеры таких целиков, основываясь на гипотезе Турнера.

Прямой расчет их размеров может быть произведен только на основе лабораторных испытаний образцов подобной формы, размеры которых позволяют использовать имеющиеся в нашем распоряжении прессы. Эти испытания составят предмет отдельного исследования.

Метод проверки М. Статиу

Рассмотрим случай разработки месторождения несколькими камерами. Будем считать, что глубина скважин не превышает 1000 м.

Условия устойчивости требуют, чтобы целики на разных этажах имели общие вертикальные оси.

По этой же причине, а также по условию прочности площадь горизонтального сечения целиков должна увеличиваться с глубиной.

Как указывалось выше, при глубине порядка 1000 м условие прочности соблюдается и напряжения в целиках не превышают сопротивления каменной соли сжатию.

С целью возможно большего увеличения коэффициента эксплуатации диаметр цилиндрических камер должен приниматься большим на верхних этажах, но не больше 50 м, по условиям технологии растворения и прочности потолочин.

Высота этажа определяется высотой цилиндрических камер и мощностью потолочин,

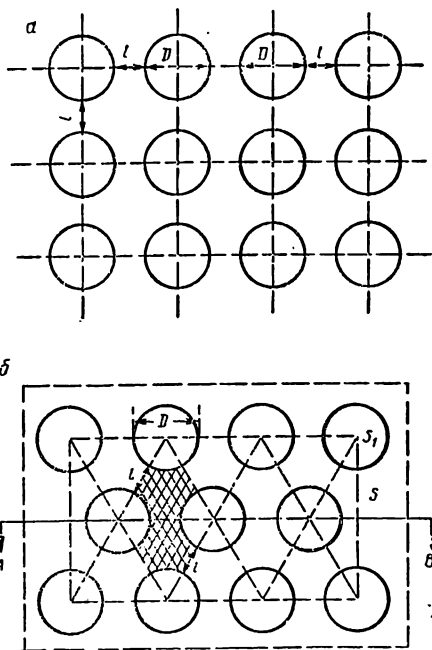


Рис. 29. Размещение цилиндрических камер: а — квадратная сетка; б — треугольная сетка

Обозначим (рис. 30):

S — площадь разработок, м^2 ;

s — суммарная площадь, занимаемая целиками, м^2 ;

N — число цилиндрических камер;

$S_c = S - s$ — суммарная площадь, занимаемая камерами, м^2 ;

$s_1 = \frac{S-s}{N} = \frac{S_c}{N}$ — площадь горизонтального сечения одной камеры, м^2 ;

H — глубина от поверхности до потолка камеры, расположенной на каком-либо этаже, м ;

e — мощность покрывающих пород, м ;

D — диаметр цилиндрической камеры, м ;

h — высота цилиндрической камеры (целика) на данном этаже, м ;

l — минимальное расстояние между двумя камерами, м ;

γ — объемный вес каменной соли, $\text{т}/\text{м}^3$;

γ_1 — средний объемный вес вышележащей толщи пород, $\text{т}/\text{м}^3$;

γ_s — объемный вес насыщенного рассола, $\text{т}/\text{м}^3$;

R_c — прочность каменной соли на сжатие, $\text{т}/\text{м}^2$;

n — коэффициент запаса целика.

Условие прочности целика, на который действует вес потолочины, покрывающих пород и собственный вес с учетом противодействия рассола, записывается следующим образом:

$$SH\gamma + Se(\gamma_1 - \gamma) + sh\gamma - (S - s)\gamma_s H \leq \frac{R_c}{n} s. \quad (79)$$

При $e = 0$ или же $\gamma = \gamma_1$, что чаще всего и наблюдается на практике

$$sH\gamma + sh\gamma - (S - s)\gamma_s H \leq \frac{R_c}{n} s, \quad (80)$$

откуда

$$\frac{s}{S} \geq \frac{(\gamma - \gamma_s) H}{\frac{R_c}{n} - h\gamma - H\gamma_s}. \quad (81)$$

Для каменной соли $\gamma = 2,2 \text{ т}/\text{м}^3$ и $\gamma_s = 1,2 \text{ т}/\text{м}^3$.

Следовательно,

$$\frac{s}{S} \geq \frac{H}{\frac{R_c}{n} - 2,2h - 1,2H}. \quad (82)$$

Входящим в эту формулу величинам R_c и n можно придавать следующие значения:

а) R_c — среднее значение кубиковой прочности, определенной лабораторными испытаниями образцов размерами 5—20 см; в этом случае $n = 4$ —5, если камеры не заполнены рассолом, и $n = 1$ —1,5, если камеры заполнены рассолом. При разработке растворением коэффициент запаса можно принимать меньшим, нежели при разработке обычным способом, когда в камерах находятся люди и до-

рогостоящее оборудование. Для каждого месторождения и каждой глубины разработок коэффициент n следует устанавливать по данным практики;

б) R_c — прочность на сжатие, определенная экстраполированием по формуле (6)

$$R_c = (r_c + k\sqrt{l}) \sqrt{\frac{l}{h}},$$

где l — минимальное расстояние между двумя цилиндрическими камерами (минимальная ширина целика);

h — высота камеры (целика).

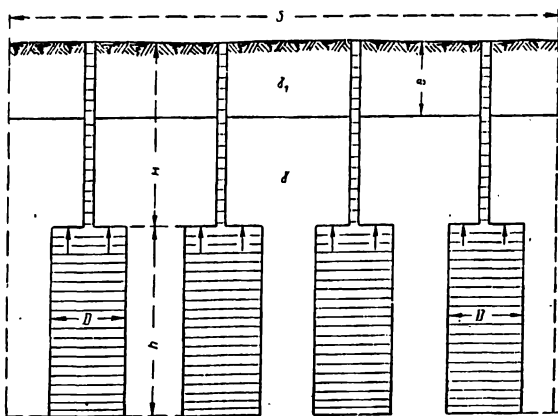


Рис. 30. Схематический разрез по месторождению, разрабатываемому раствором

Это дает некоторый запас, так как фактическая площадь целика больше площади целика ширины l .

В данном случае по тем же соображениям $n=15$, если камеры не заполнены раствором, и $n < 5$, если они заполнены раствором.

При данных значениях H , R_c и h и $\frac{s}{S} < 1$, помимо условия (82), опорные целики должны удовлетворять еще условию

$$\sigma_c \leq R_{c. \text{ доп}} = \frac{R_c}{n}, \quad (83)$$

где

$$\sigma_c \leq \frac{H}{\frac{s}{S}} + 2,2h + 1,2H. \quad (84)$$

Метод проверки, предложенный Главным управлением по эксплуатации департамента неорганической химии Министерства нефти и химической промышленности*

На рис. 31 приведен схематический вертикальный разрез по месторождению с указанием нагрузок на междукамерные целики.

Обозначим:

S_e — площадь разработок, m^2 ;

$S_i = S_{i_1} + S_{i_2} + \dots + S_{i_n}$ — суммарная площадь, занимаемая цилиндрическими камерами, m^2 .

Суммарная нагрузка на площадь разработок, обусловленная давлением $p_e = p_z = 2,2H \text{ т/м}^2$, составляет $2,2S_eH, \text{ т}$.

Этой нагрузке противостоит, при давлении рассола в камерах $p_i = 1,2H, \text{ т/м}^2$ ($1,2 \text{ т/м}^3$ — объемный вес рассола), усилие $1,2 S_iH, \text{ т}$.

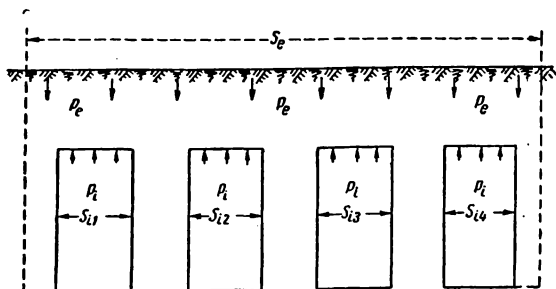


Рис. 31. Схема нагрузок на опорные целики (по DGEM)

Разница этих усилий воспринимается опорными целиками

$$\sigma_z = \frac{2,2S_eH - 1,2S_iH}{S_e - S_i}. \quad (85)$$

Обозначим

$\frac{S_i}{S_e} = C_e$ — коэффициент использования площади разработок.

Следовательно, $0 < C_e < 1$; $S_i = C_e S_e$;

$$\sigma_z = \frac{2,2 - 1,2C_e}{1 - C_e} H = C' H. \quad (86)$$

В табл. 10 приведены значения C' в зависимости от C_e , рассчитанные по формуле

$$C' = \frac{2,2 - 1,2C_e}{1 - C_e}. \quad (87)$$

Т а б л и ц а 10

C_e	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
C'	2,2	2,3	2,45	2,63	2,9	3,2	3,7	4,53	6,2	11,2	∞

* DGEM,

Сжимающее напряжение $\sigma_z = C'H$ принимает значения от $2,2H$ до ∞ .

Если в камерах рассола нет, формула (85) принимает вид

$$\sigma_z = \frac{2,2S_e H}{S_e - S_i} \quad (88)$$

Заменив $S_i = C_e S_e$, получим

$$\sigma_z = \frac{2,2}{1 - C_e} H = C'' H. \quad (89)$$

В табл. 11. приведены значения C'' в зависимости от C_e , рассчитанные по формуле

$$C'' = \frac{2,2}{1 - C_e}. \quad (90)$$

Таблица 11

C_e	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
C''	2,2	2,44	2,75	3,14	3,66	4,4	5,5	7,33	11	22	∞

И в этом случае значения сжимающего напряжения σ_z заключены между $2,2H$ и ∞ , но возрастают быстрее, чем в случае заполненных насыщенным рассолом камер.

Вообще величина σ_z зависит от коэффициента использования площади разработок. Эта величина не должна быть больше допустимого напряжения каменной соли на сжатие.

С точки зрения прочности опорных целиков благоприятно, чтобы камеры были заполнены раствором.

Условие прочности целиков записывается в виде

$$\sigma_z \leq \frac{R_c}{n},$$

где R_c — прочность каменной соли на сжатие;

n — принятый коэффициент запаса.

Метод проверки Г. де Ля Гупиера

Если обозначить:

$r = \frac{D}{2}$ — радиус цилиндрической камеры (см. рис. 29);

l — минимальное расстояние между двумя соседними камерами;

$\alpha = \frac{l}{2r} = \frac{l}{D}$ (при прочих прежних обозначениях), условие прочности междуканальных целиков запишется в виде:

При квадратной сетке камер

$$(2r + l)^2 H \Delta + [(2r + l)^2 - \pi r^2] h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} [(2r + l)^2 + \pi r^2]; \quad (91)$$

$$(1 + \alpha)^2 H \Delta + \left[(1 + \alpha)^2 - \frac{\pi}{4} \right] h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} \left[(1 + \alpha)^2 - \frac{\pi}{4} \right]; \quad (91')$$

В данном случае коэффициент эксплуатации определяется из выражения

$$\rho = \frac{\pi r^2}{(2r + l)^2} = \frac{\pi}{4(1 + \alpha)^2}; \quad (92)$$

при треугольной, в виде равностороннего треугольника, сетке камер

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{3}}{4} (2r + l)^2 H \Delta + \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (2r + l)^2 - \frac{\pi r^2}{2} \right] h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} \times \\ \times \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (2r + l)^2 - \frac{\pi r^2}{2} \right], \end{aligned} \quad (93)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{3}}{4} (1 + \alpha)^2 H \Delta + \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + \alpha)^2 - \frac{\pi}{8} \right] h \delta \leq 10\,000 \frac{R}{n} \times \\ \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + \alpha)^2 - \frac{\pi}{8} \right]. \end{aligned} \quad (93')$$

Коэффициент эксплуатации

$$\rho' = \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}(2r + l)^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}(1 + \alpha)^2}. \quad (94)$$

При одинаковых l и r получаем $\frac{\rho'}{\rho} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,1547$, т. е. второй вариант выгоднее первого с точки зрения величины коэффициента эксплуатации.

Используя формулы (91') и (93') для предельного случая, можно определить величину α , с помощью которой из зависимости $l = 2r\alpha = D\alpha$ рассчитывается минимальное расстояние между камерами при известном радиусе цилиндров.

Проверочные формулы Г. де Ля Гупиера обладают тем существенным недостатком, что не учитывают противодействия рассола. Так как это давление растет с глубиной, непринятие его в расчет приводит к завышению размеров целиков, особенно если глубина разработок больше 450 м, как будет показано ниже на примерах.

Расчет конструктивных элементов этажа

Рассмотрим случай разработки камерами диаметром D и высотой h при минимальной ширине целиков l и расстоянии между вертикальными осями камер $D + l$. В плане центры сечений камер расположены в углах равносторонних треугольников со сторонами $D + l$ (см. рис. 29, б).

На рис. 32 приведен схематический вертикальный разрез по А—В; для простоты разрез охватывает только по две камеры на каждом

этаже. Этажи пронумерованы в соответствующем разработке порядке, т. е. снизу вверх.

Камеры двух соседних этажей разделены потолочинами, форма и размеры которых зависят от принятого варианта системы, диаметра цилиндров, физико-механических свойств каменной соли, от того, заполнен ли цилиндр рассолом или нет и т. д. Практически, как будет показано ниже, мощность потолочин рассчитывается по методу повторных попыток.

Определение мощности потолочин

Рассмотрим потолочину, разделяющую две камеры диаметром 50 м, изображенную на рис. 33.

Потолочина рассматривается как круглая заделанная по контуру плита, изгибаемая собственным весом и гидростатическим давлением (рис. 34).

Проверка ее прочности заключается в определении по приводимым ниже формулам напряжений σ_r и σ_t в ее центре и на периферии и сопоставлении их с соответствующим допускаемым для каменной соли напряжением R . При данных размерах потолочины условие прочности

$$\sigma_r < R \text{ и } \sigma_t < R.$$

Формулы для напряжений в равномерно загруженных заделанных по контуру круглых плитах имеют вид [27]*.

Напряжения в центре

$$\sigma_r = \sigma_t = \pm \frac{3(1+\mu)pr^2}{8h_{pc}^2} \cong \pm 0,5p \frac{r^2}{h_{pc}^2}. \quad (95)$$

Сжатие (—) на верхней и растяжение (+) на нижней стороне плиты.

Напряжения на контуре

$$\sigma_r = \pm \frac{0,75pr^2}{h_{pm}^2}; \quad \sigma_t = \pm \mu \sigma_r = \pm 0,33 \sigma_r. \quad (96)**$$

Растяжение (+) на верхней и сжатие (—) на нижней стороне плиты. Здесь

$\mu = 0,33$ — коэффициент Пуассона для каменной соли;

σ_r — радиальное напряжение;

σ_t — тангенциальное напряжение;

h_{pc} и h_{pm} — толщина плиты в центре и на контуре.

Для потолочины, изображенной на рис. 33,

$$p = p_1 + p_2 - p_3 - p_4,$$

где p — суммарная нагрузка на 1 м² площади потолочины;

p_1 — собственный вес, приходящийся на 1 м² потолочины;

p_2 — вес осадков на 1 м² потолочины;

p_3 — противодействие рассола на 1 м² потолочины;

p_4 — противодействие (по закону Архимеда) рассола на осадки, отнесенное к 1 м² площади потолочины.

* Эти формулы верны для тонких плит; для толстых плит (наш случай) они приводят к некоторому излишнему запасу прочности.

** Формулы (95)—(96) совершенно неприменимы для потолочин с $h \geq r$, так как такие потолочины вообще не могут рассматриваться как плиты. (Прим. ред.)

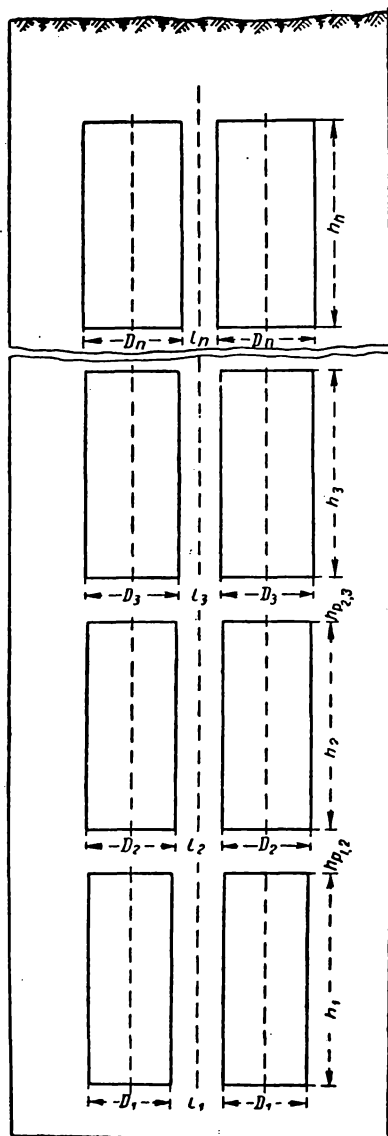


Рис. 32. Разрез по А — В (см. рис. 29)

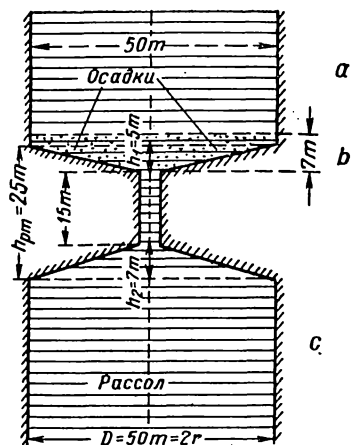


Рис. 33. Форма и размеры потолчины между двумя камерами: а — рабочая камера; б — средняя мощность слоя осадков; с — заложенная камера

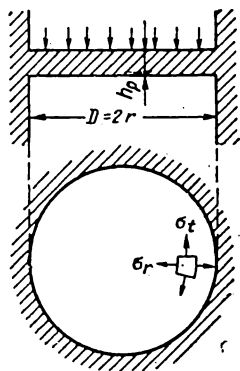


Рис. 34. К определению напряжений в круглой плите

В нашем случае:
объем потолочины

$$\pi r^2 h_{pm} - \frac{1}{3} \pi r^2 (h_1 + h_2) = \pi r^2 \left[h_{pm} - \frac{1}{3} (h_1 + h_2) \right] =$$

$$= 3,14 (27 - 4) 25^2 = 3,14 \cdot 23 \cdot 25^2, \text{ м}^3,$$

где

$$r = 25 \text{ м}; \quad h_{pm} = 27 \text{ м}; \quad h_1 = 5 \text{ м и } h_2 = 7 \text{ м};$$

вес потолочины $3,14 \cdot 23 \cdot 25^2 \gamma_a, \text{ т}$,

где γ_a — объемный вес каменной соли;

площадь потолочины $\pi r^2 = 3,14 \cdot 25^2, \text{ м}^2$

$$\rho_1 = \frac{3,14 \cdot 23 \cdot 25^2 \gamma_a}{3,14 \cdot 25^2} = 23 \gamma_a, \text{ т/м}^2.$$

Принимая по данным практики разработок на месторождении Окна Мурешулуй, что высота слоя осадков равна 7 м, и обозначая их объемный вес γ'_a , получим после аналогичных выкладок

$$\rho_2 = 7 \gamma'_a, \text{ т/м}^2.$$

По закону Архимеда имеем: $\rho_3 = 23 \gamma_s, \text{ т/м}^2$; и $\rho_4 = 7 \gamma_s, \text{ т/м}^2$, где γ_s — объемный вес насыщенного рассола.

Для каменной соли: $\gamma_a = 2,2 \text{ т/м}^3$; $\gamma_s = 1,2 \text{ т/м}^3$ и $\gamma'_a = 2 \text{ т/м}^3$ (по данным практики). Следовательно:

$$\rho_1 = 23 \gamma_a = 23 \cdot 2,2 \text{ т/м}^2; \quad \rho_2 = 7 \gamma'_a = 7 \cdot 2 \text{ т/м}^2; \quad \rho_3 = 23 \gamma_s =$$

$$= 23 \cdot 1,2 \text{ т/м}^2; \quad \rho_4 = 7 \gamma_s = 7 \cdot 1,2 \text{ т/м}^2$$

и

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 - \rho_3 - \rho_4 = 23 \cdot 2,2 + 7 \cdot 2 - 23 \cdot 1,2 - 7 \cdot 1,2 =$$

$$= 28,6 \text{ т/м}^2.$$

Подставляя это значение в формулы (95) и (96), получим: напряжения в центре потолочины

$$\sigma_r = \sigma_t = \mp 0,5 \rho \frac{r^2}{h^2_{pc}} = \mp 0,5 \cdot 28,6 \frac{25^2}{15^2} \cong \mp 39,7 \text{ т/м}^2;$$

напряжения на контуре потолочины

$$\sigma_r = \pm 0,75 \rho \frac{r^2}{h^2_{pm}} = \pm 0,75 \cdot 28,6 \frac{25^2}{27^2} = \pm 18,5 \text{ т/м}^2;$$

$$\sigma_t = \pm 0,33 \sigma_r = \pm 6,10 \text{ т/м}^2.$$

Для каменной соли месторождения Окна Мурешулуй, где в настоящее время применяется разработка растворением, имеем следующие прочностные характеристики [44]:

прочность на растяжение — $18,7 \text{ кг/см}^2$, или 187 т/м^2 ;

прочность на изгиб — $24,4 \text{ кг/см}^2$, или 244 т/м^2 .

Принимая коэффициент запаса $n = 4$, получаем допускаемое напряжение на растяжение $\frac{187}{4} = 46,75 \text{ т/м}^2$ и допускаемое напряжение на изгиб $\frac{244}{4} = 61 \text{ т/м}^2$.

Так как расчетные напряжения меньше допускаемых, мощность потолочины назначена с запасом.

Рассмотрим потолочину меньшей мощности: $h_{pm} = 22$ м; $h_{pc} = 10$ м; $h_1 = 5$ м и $h_2 = 7$ м;

объем потолочины

$$3,14r^2 \left[h_{pm} - \frac{1}{3} (h_1 + h_2) \right] = 3,14 \cdot 25^2 \cdot 18 = 35\,325 \text{ м}^3;$$

вес потолочины

$$35\,325 \gamma_a = 35\,325 \cdot 2,2 = 77\,715 \text{ т};$$

$$p_1 = \frac{35\,325}{3,14 \cdot 25^2} \cdot 2,2 = 18 \cdot 2,2 = 39,6 \text{ т/м}^2; \quad p_2 = 7 \gamma_a = 7 \cdot 2 = 14 \text{ т/м}^2;$$

$$p_3 = 18 \gamma_s = 18 \cdot 1,2 = 21,6 \text{ т/м}^2; \quad p_4 = 7 \gamma_s = 7 \cdot 1,2 = 8,4 \text{ т/м}^2;$$

$$p = p_1 + p_2 - p_3 - p_4 = 39,6 + 14 - 21,6 - 8,4 = 23,6 \text{ т/м}^2;$$

напряжения в центре потолочины

$$\sigma_r = \sigma_s = \mp 0,5p \frac{r^2}{h_{pc}^2} = \mp 0,5 \cdot 23,6 \frac{25^2}{10^2} = \mp 73,75 \text{ т/м}^2;$$

напряжения на контуре потолочины

$$\sigma_r = \pm 0,75p \frac{r^2}{h_{pm}^2} = \pm 0,75 \cdot 23,6 \frac{25^2}{22^2} = \pm 22,83 \text{ т/м}^2;$$

$$\sigma_s = \pm 0,33 \sigma_r = \pm 0,33 \cdot 22,83 = \pm 7,53 \text{ т/м}^2.$$

При $R_t = 187 \text{ т/м}^2$ запас прочности потолочины в наиболее опасном месте — центре $n = \frac{187}{73,75} = 2,5$. Следовательно, мощность потолочины назначена правильно.

Если размеры потолочины $h_{pm} = 20$ м; $h_{pc} = 8$ м; $h_1 = 5$ м; $h_2 = 7$ м, объем потолочины

$$3,14 \cdot r^2 \left[h_{pm} - \frac{1}{3} (h_1 + h_2) \right] = 3,14 \cdot 25^2 \cdot 16 = 31\,520 \text{ м}^3;$$

вес потолочины

$$31\,520 \gamma_a = 31\,520 \cdot 2,2 = 69\,344 \text{ т};$$

$$p_1 = \frac{31\,520}{3,14 \cdot 25^2} \cdot 2,2 = 16,00 \cdot 2,2 = 35,20 \text{ т/м}^2;$$

$$p_2 = 7 \gamma_a = 7 \cdot 2 = 14 \text{ т/м}^2; \quad p_3 = 16,00 \gamma_s = 16,00 \cdot 1,2 = 19,20 \text{ т/м}^2; \quad p_4 = 7 \gamma_s = 7 \cdot 1,2 = 8,4 \text{ т/м}^2;$$

$$p = p_1 + p_2 - p_3 - p_4 = 35,20 + 14 - 19,20 - 8,40 = 21,60 \text{ т/м}^2;$$

напряжения в центре потолочины

$$\sigma_r = \pm 0,75p \frac{r^2}{h_{pm}^2} = \pm 0,75 \cdot 21,60 \frac{25^2}{8^2} = \pm 105,7 \text{ т/м}^2;$$

напряжения на контуре потолочины

$$\sigma_r = \pm 0,75\rho \frac{r^2}{h_{pm}^2} = \pm 0,75 \cdot 21,60 \frac{25^2}{20^2} = \pm 25,38 \text{ т/м}^2;$$

$$\sigma_t = \pm 0,33\sigma_r = \pm 0,33 \cdot 25,38 = \pm 8,37 \text{ т/м}^2.$$

По тем же соображениям запас прочности $n = \frac{187}{105,7} = 1,76$. И в этом случае мощность потолочины достаточна.

О выборе размеров опорных целиков при разработке растворе-нием в зависимости от глубины разработок

Как и при разработке обычным способом, при разработке раствором размеры целиков должны удовлетворять двум условиям: прочности и минимальных деформаций.

Так как при глубинах до 114 м каменная соль находится в упругом режиме, расчет целиков на этих глубинах не представляет никаких трудностей: достаточно удовлетворить условиям (82) и (83). Размеры целиков должны быть возможно меньше во избежание излишних потерь полезного ископаемого.

На глубинах 114—456 м в условиях медленно растущих во времени малых пластических деформаций столбы рассчитываются таким же образом — по формулам (82) и (83). Наличие в камерах рассола увеличивающейся концентрации (насыщенного в стадии эксплуатации) повышает запас прочности столбов и уменьшает их продольные и поперечные деформации. Как было показано в гл. V, на этих глубинах деформации опорных целиков относительно невелики.

На глубинах 456—1000 м каменная соль испытывает большие пластические деформации, растущие быстрее, чем в предыдущем случае. Это явление изучено пока только качественно автором [43] и Бушем. Недавно автор имел возможность ознакомиться с положением дел на месторождении Окна Мурешулуй.

На скважинах рудника им. Г. Георгиу-Деж глубиной 700 м, а также на скважинах нового рудника, расположенного в центрально-восточной части месторождения, замечено, что при прекращении подачи пресной воды поступление рассола из скважин продолжается, причем тем больше, чем глубже скважина. По предложению автора, руководство рудника распорядилось замерять расход рассола, для того чтобы можно было судить о величине поперечных деформаций — сужении скважин. До выхода в свет настоящей книги были замерены расходы рассола на скважине № 102 первого поля (рудник им. Г. Георгиу-Деж, гор. 150 м).

Глубина скважины от поверхности составляла 700 м, а от отметки горизонта 150 м — 550 м.

Размеры цилиндра во время замеров: радиус — 15,5 м; высота — 54,95 м. Проектные размеры: радиус 31 м, высота 136,82 м.

Общий объем скважины, включая объем цилиндра, равен 109 288 м³.

Расход рассола составил 204 л/ч, или 4896 л/сутки. Это явление свидетельствует, пока тоже лишь качественно, о пластических деформациях каменной соли.

Наличие рассола в камерах (противодавление на целики) приводит к уменьшению пластических деформаций.

На глубинах 456—1000 м опорные целики должны также удовлетворять условиям (82) и (83).

Отметим, что до глубины 1000 м сжимающие напряжения в целиках меньше прочности каменной соли, так что зависимость (82) остается в силе. Зазор между стенками скважины и рабочей колонной должен быть достаточным во избежание зажима колонны при сужении диаметра скважины.

На глубинах, превышающих 1000 м, разработка соли растворением, в том виде, в каком она осуществлена на месторождении Окна Мурешулуй, осложняется вследствие трудности осуществления бурения скважин с допустимыми отклонениями от вертикали. При больших же отклонениях могут быть растворены целики, а регулировать размеры полости, образующейся при объединении двух камер, практически невозможно.

Кроме того, если глубина больше 1000 м, трудно соблюсти проектные размеры целиков, так как они испытывают очень большие пластические деформации как продольные, так и поперечные. Рабочая колонна может зажиматься при сужении скважины, если зазор между ней и стенками скважины недостаточно велик.

Начиная с некоторой глубины, разработка соли растворением вообще невозможна, так как напряжения в целиках превзойдут предел прочности. Кроме того, пластические деформации могут быть столь велики, что рабочая колонна окажется зажатой, как бы велик ни был зазор, что приведет к нарушению процесса растворения.

Применив формулу (82) для предельного случая, можно определить предельную глубину разработок растворением

$$\frac{H}{\frac{R_c}{n} - 2,2h - 1,2H} = 1, \quad (97)$$

откуда

$$H_m = \frac{R_c}{2,2n} - h. \quad (98)$$

Принимая в среднем $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$ [44], получим $H = 1480 - h$ при $n = 1$ и $H = 370 - h$ при $n = 4$.

Полученные результаты говорят о том, что, даже если камеры заполнены насыщенным рассолом, теоретически предельная глубина разработок методом растворения не превышает 1500 м.

Так как на месторождении Окна Мурешулуй успешно эксплуатируются скважины глубиной 700 м, приходим к выводу, что можно принимать коэффициент запаса $n < 4$.

Так, например, подставляя в формулу (98) R_c и h , получим для данного месторождения

$$H = \frac{R_c}{2,2n} - h \text{ или } n = \frac{R_c}{2,2(H+h)} = \frac{3250}{2,2 \cdot 700} \cong 2,1.$$

Глубина 1500 м, полученная по формуле (98), является чисто теоретической и требует проверки на практике.

Опыт успешной эксплуатации в течение четырех лет на том же месторождении скважин глубиной 1040—1060 м (рабочая колонна не зажималась) говорит о том, что можно принимать $n < 2,1$.

Действительно, из формулы (98) получаем

$$n = \frac{R_c}{2,2(H+h)} = \frac{3250}{2,2 \cdot 1000} = 1,47 \cong 1,5.$$

Если вместо прочности, полученной испытанием кубиков обычных размеров, подставить в (98) прочность, определенную экстраполированием по формуле (6) при $l = 25$ м и $h = 120$ м,

$$R_c = (174 + 49 \sqrt{2500}) \sqrt{\frac{2500}{12000}} = 1207 \text{ кг/см}^2, \text{ или } 12070 \text{ т/м}^2,$$

то при $H = 580$ м получим

$$n \leq \frac{R_c}{2,2(H+h)} = \frac{12070}{2,2(580+120)} = 7,8$$

и при $H = 880$ м

$$n \leq \frac{R_c}{2,2(H+h)} = \frac{12070}{2,2(880+120)} = 5,5,$$

т. е. $n < 10$, против $n = 10-20$ при разработке обычным способом.

Применим наши три метода для проверки целиков на нижнем и верхнем этажах разработок (рис. 35).

Пример 1. I этаж; отметка 1000—880 м; диаметр цилиндров $D = 40$ м; высота цилиндров $h = 120$ м; высота опорных целиков $h = 120$ м; минимальная ширина опорных целиков $l = 25$; расстояние от земной поверхности до потолка цилиндров $H = 880$ м.

Метод М. Стаматиу. Используем формулу (82)

$$\frac{s}{S} \geq \frac{H}{\frac{R_c}{n} - 2,2h - 1,2H}.$$

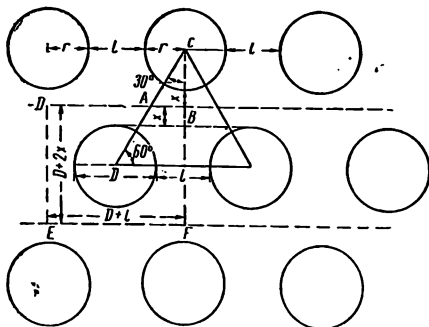


Рис. 35. К расчету опорных целиков

При $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$, для того чтобы $\frac{s}{S} < 1$, необходимо $1 < n < 1,47$ (см. выше).

При $n = 1$ (для предельного случая)

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{880}{3250 - 2,2 \cdot 120 - 1,2 \cdot 880} = \frac{880}{1930} = 0,456;$$

при $n = 1,25$

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{880}{1388} = 0,630.$$

Для одного цилиндра (рис. 35) имеем

$$S' = (D + l)(D + 2x) = (D + l)^2 \sin 60^\circ = 0,866 (D + l)^2.$$

Для опорного целика

$$s' = S' - \pi \frac{D^2}{4} = 0,866 (D + l)^2 - \frac{\pi D^2}{4}.$$

С учетом этих зависимостей

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{0,866 (D + l)^2 - \frac{\pi D^2}{4}}{0,866 (S + l)^2}.$$

Полагая в этой формуле $D = 40 \text{ м}$ и $l = 25 \text{ м}$, находим

$$\frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{0,866 (40 + 25)^2 - 3,14 \frac{40^2}{4}}{0,866 (40 + 25)^2} = \frac{2403}{3659} = 0,657 < 1,$$

т. е. условие (82) соблюдено.

Так как $\frac{s}{S} \text{ действ} = 0,657 > \frac{s}{S} \text{ расч} = 0,456$, опорные целики при минимальной ширине $l = 25 \text{ м}$ удовлетворяют условию прочности.

Точно так же применяя (84), получим

$$\sigma_c = \frac{H}{\frac{s}{S}} + 2,2h + 1,2H = \frac{880}{0,657} + 2,2 \cdot 120 + 1,2 \cdot 880 =$$

$$= 1339 + 264 + 1056 = 2659 \text{ т/м}^2.$$

Так как $\sigma_c = 2659 \text{ т/м}^2 < R_c = 3250 \text{ т/м}^2$, условие (83) соблюдено.

Если определить R_c экстраполированием по формуле (6) для соли месторождения Окна Мурешулуй, получим

$$R_c = (174 + 49 \sqrt{2500}) \sqrt{\frac{2500}{12000}} = 1207 \text{ кг/см}^2$$

и для румынской соли вообще в соответствии с формулой (10) [47].

$$R_c = (123,5 + 59,3 \sqrt{2500}) \sqrt{\frac{2500}{12000}} = (123,5 + 59,3 \cdot 50) \cdot 0,458 =$$

$$= 1415 \text{ кг/см}^2.$$

Подставив это значение в формулу (82) при $n = 4$ (при $H + h = 880 + 120 = 1000$ м, $n < 5,5$), получим

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{H}{\frac{R_c}{n} - 2,2h - 1,2H} = \frac{880}{\frac{12070}{4} - 2,2 \cdot 120 - 1,2 \cdot 880} = \frac{880}{1695} \cong 0,5.$$

Точно так же при $n = 3,6$

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = 0,438, \text{ т. е. в обоих случаях меньше } \frac{s}{S} \text{ действ} = 0,657.$$

Применяя формулу (84), получим

$$\sigma_c = \frac{H}{\frac{s}{S}} + 2,2h + 1,2H = \frac{880}{0,5} + 2,2 \cdot 120 + 1,2 \cdot 880 = 3080 \text{ т/м}^2.$$

Следовательно, и в этом случае условия (82) и (83) соблюдены

$$\frac{s}{S} \cong 0,5 < 1$$

$$\text{и } \sigma_c = 3080 \text{ т/м}^2 < R_c = 12070 \text{ т/м}^2,$$

т. е. размеры столба $l = 25$ м и $h = 120$ м назначены правильно.

Метод Д. Г. Е. М. Так как цилиндры всегда заполнены насыщенным рассолом, применяем формулу (86)

$$\sigma_z = \frac{2,2 - 1,2C_e}{1 - C_e} H, \text{ где } C_e = \frac{S_l}{S_e} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{0,866(D+l)^2}.$$

В нашем случае $D = 40$ м, $l = 25$ м и $H = 880$ м, т. е.

$$C_e = \frac{3,14 \cdot \frac{40^2}{4}}{0,866(40 + 25)^2} = \frac{1256}{3659} = 0,343 \text{ и}$$

$$\sigma_z = \frac{2,2 - 1,2 \cdot 0,343}{1 - 0,343} \cdot 880 = 2,72 \cdot 880 = 2393 \text{ т/м}^2.$$

Так как для соли месторождения Окна Мурешулуй $R_c = 3250 \text{ т/м}^2$ (среднее значение) и $R_c = 12070 \text{ т/м}^2$ [по формуле (6)], а для румынской соли вообще $R_c = 14150 \text{ т/м}^2$, условие (83) соблюдено:

$$\sigma_z = 2393 \text{ т/м}^2 < \frac{R_c}{n} = \frac{12070}{n} \text{ т/м}^2 \text{ соответственно } \frac{14150}{n} \text{ т/м}^2,$$

где $n = 1 - 4$.

Метод Г. де Ля Гупиера. Применяя формулу (93") при

$$\alpha = \frac{l}{D} = \frac{25}{40} = 0,625, \text{ получаем}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,625)^2 \cdot 880 \cdot 2200 + \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,625)^2 - \frac{3,14}{8} \right] 120 \times$$

$$\times 2200 \leq 10000 \frac{325}{4} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,625)^2 - \frac{3,14}{8} \right],$$

или

$$2209557 + 197689 = 2407246 > 636480,$$

что свидетельствует о том, что при данных размерах столбов это условие не соблюдается.

Этот результат противоречит данным практики, что объясняется тем, что при глубине 1000—880 м мы пренебрегли противодействием насыщенного рассола ($\gamma_s = 1200 \text{ кг/м}^3$).

Пример 2. VIII этаж. Отметка 60—160 м, диаметр цилиндров $D = 50 \text{ м}$; высота цилиндров $h = 100 \text{ м}$; высота опорных целиков $h = 100 \text{ м}$; минимальная ширина столбов $l = 15 \text{ м}$; расстояние от поверхности до потолка цилиндров $H = 60 \text{ м}$.

Отметим, что на нижних этажах высота цилиндров $h = 120 \text{ м}$, средняя мощность потолочины $h_n = 20 \text{ м}$, диаметр цилиндров $D = 40\text{—}50 \text{ м}$, а ширина целиков $l = 25\text{—}15 \text{ м}$.

Расчет производится как в предыдущем примере. Метод М. Стаматиу. Применим (82) при $R_c = 325 \text{ кг/см}^2$ и $n = 1$.

$$\frac{s}{S} \text{ расч} = \frac{H}{\frac{R_c}{n} - 2,2h - 1,2H} = \frac{60}{\frac{3250}{1} - 2,2 \cdot 100 - 1,2 \cdot 60} =$$

$$= \frac{60}{3250 - 292} = \frac{60}{2958} \cong 0,02, \text{ а при } n = 1,5 \dots \frac{s}{S} \text{ расч} \cong 0,032.$$

Из формулы (84) следует

$$\sigma_c = \frac{H}{\frac{s}{S}} + 2,2h + 1,2H = \frac{60}{0,463} + 2,2 \cdot 100 + 1,2 \cdot 60 = 130 + 220 +$$

$$+ 72 = 422 \text{ т/м}^2.$$

$$\text{Здесь } \frac{s}{S} \text{ действ} = \frac{0,866 (D + l)^2 - \frac{\pi D^3}{4}}{0,866 (D + l)^2} =$$

$$= \frac{0,866 (50 + 15)^2 - 3,14 \frac{50^3}{4}}{0,866 (50 + 15)^2} = \frac{3659 - 1963}{3659} = 0,463.$$

Так как $\frac{s}{S} \text{ действ} = 0,463 > \frac{s}{S} \text{ расч} = 0,02$ соответственно 0,032

$$\text{и } \sigma_c = 422 \text{ т/м}^2 < R_c = 3250 \text{ т/м}^2,$$

условия (82) и (83) соблюдены, т. е. размеры $l = 15 \text{ м}$ и $h = 100 \text{ м}$ выбраны правильно.

По формуле (6) $R_c = (r_c + k\sqrt{l})\sqrt{\frac{l}{h}}$, для соли месторождения Окна Мурешулуй имеем

$$R_c = (174 + 49\sqrt{1500})\sqrt{\frac{1500}{10000}} = (174 + 49 \cdot 38,7) \cdot 0,387 =$$

$$= (174 + 2070) \cdot 0,387 = 801 \text{ кг/см}^2,$$

Для этого значения прочности при $n = 4$ (см. гл. VII, метод автора) следует

$$\frac{s}{S} \text{ расч} \geq \frac{R_c}{\frac{n}{n} - 2,2h - 1,2H} = \frac{8010}{\frac{60}{4} - 220 - 72} = 0,035.$$

Из выражения (84) следует

$$\sigma_c = \frac{H}{\frac{s}{S}} + 2,2h + 1,2H = \frac{60}{0,463} + 2,2 \cdot 100 + 1,2 \cdot 60 = 422 \text{ т/м}^2.$$

Так как условия (82) и (83) опять-таки соблюдены:

$\frac{s}{S} \text{ действ} = 0,463 > \frac{s}{S} \text{ расч} = 0,035$ и $R_c = 8010 \text{ т/м}^2 > \sigma_c = 422 \text{ т/м}^2$, размеры целиков $l = 15 \text{ м}$ и $h = 100 \text{ м}$ назначены правильно. Метод Д. Г. Е. М. Из выражения (86) следует

$$\sigma_z = \frac{2,2 - 1,2C_e}{1 - C_e} H, \text{ где } C_e = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{0,866(D + l)^2};$$

$$\text{при } C_e = \frac{3,14 \cdot \frac{50^2}{4}}{0,866(50 + 15)^2} = \frac{1963}{3659} = 0,536$$

$$\sigma_z = \frac{2,2 - 1,2 \cdot 0,536}{1 - 0,536} \cdot 60 = \frac{1,557 \cdot 60}{0,464} = 200 \text{ т/м}^2.$$

Так как условие (83) соблюдено — $\sigma_z = 200 \text{ т/м}^2 < \frac{R_c}{n} = \frac{3250}{n} \text{ т/м}^2$ при $n = 1 \div 4$, то размеры целиков назначены правильно.

Условие (83) соблюдается и в том случае, если R_c определено по формуле (6).

Метод Г. де Ля Гуниера. Применяя (93') при

$$\alpha = \frac{l}{D} = \frac{15}{30} = 0,5, \quad \text{получим}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,4)^2 \cdot 60 \cdot 2200 + \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,3)^2 - \frac{3,14}{8} \right] 100 \cdot 2200 \leq$$

$$\leq 10\,000 \frac{325}{4} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} (1 + 0,3)^2 - \frac{3,14}{8} \right] \text{ или}$$

$$0,43 \cdot 1,69 \cdot 60 \cdot 2200 + (0,43 \cdot 1,69 - 0,392) \cdot 100 \cdot 2200 \leq$$

$$\leq 10\,000 \cdot 81 (0,43 \cdot 1,69 - 0,392),$$

или

$$95\,924 + 73\,634 = 169\,558 < 271\,107.$$

Так как это условие соблюдено, размеры целиков выбраны правильно.

На этот раз метод Г. де Ля Гуниера привел к верному результату, потому что при небольшой глубине (60—160 м) противодействие рассола невелико и мало влияет на прочность опорного целика.

Выводы и предложения

Рассмотрев различные методы проверки и расчета целиков, можно прийти к заключению, что большинство из них основаны на гипотезе Турнера. Исключением являются методы, основанные на других гипотезах; как правило, расчет по этим методам приводит к необоснованному завышению размеров целиков.

Несмотря на присущие ей недостатки, гипотеза Турнера, по-видимому, вполне приемлема.

Из сравнения рассмотренных методов следует сделать следующие выводы:

1. При разработке камерно-столбовой системой можно применять:

а) для расчета размеров опорных целиков:

метод Л. Д. Шевякова при $n = 4-5$ для румынской каменной соли; для других полезных ископаемых n следует определять по данным практики;

Метод М. М. Протодяконова, скорректировав, однако, формулу (48) следующим образом (для румынской каменной соли):

$T = k \sqrt{\frac{\gamma a H}{f}}$, где $k = 0,65-0,3$, в зависимости от глубины разработок; для других полезных ископаемых k следует определять по данным практики;

метод С. С. Давыдова, изменив таким же образом формулу (49) (для румынской каменной соли $k = 0,65-0,3$);

метод Г. де Ля Гупиера, но для предельного случая при $n = 4-5$ для румынской каменной соли; для других полезных ископаемых n следует определять по данным практики;

метод М. Стаматиу (54 г), где $\varphi = 45^\circ + \rho/2$, где ρ — угол внутреннего трения породы целика, определяемый из лабораторных испытаний по огибающей кругов Мора;

б) для проверки размеров опорных целиков:

метод М. Стаматиу с оговоркой, что если R_c определяется экстраполированием по формуле (6), то $n = 10-20$, если же R_c определяется испытанием кубиков, обычных (5—20 см) размеров, то для румынской каменной соли $n = 4-5$, для других полезных ископаемых n определяется по данным практики;

метод К. В. Руппенейта.

2. При разработке каменной соли растворением размеры целиков можно проверить по методу М. Стаматиу и по методу D.G.E.M.

В обоих случаях, если R_c определяется лабораторными испытаниями кубиков обычных (5—20 см) размеров, $n = 1,0-1,5$, если же рассчитывается экстраполированием по формуле (6) (для румынской каменной соли), $n = 3,5-4,5$.

3. Помимо условия прочности размеры опорных целиков должны удовлетворять условию минимальных деформаций. Деформации целиков измеряются путем маркшейдерских наблюдений или же, в случае упругого режима, рассчитываются по формулам (8—11) Л. Д. Шевякова.

4. Предельная глубина разработок камерно-столбовой системой составляет 1000—1100 м. Что же касается предельной глубины разработок растворением в том виде, в каком она применяется в настоящее время в РНР с цилиндрическими камерами, по условиям бурения она не может превышать 1500 м.

5. Вариант камерно-столбовой системы с нисходящим забоем и камерами трапецевидного сечения может применяться до глубины 300 м.

6. Вариант камерно-столбовой системы с восходящим забоем и камерами прямоугольного сечения может применяться до глубины 1000 м. На больших глубинах рекомендуется придавать потолку камер сводчатую форму и работать с закладкой.

7. При разработке растворением цилиндры должны быть постоянно заполнены насыщенным рассолом, это способствует уменьшению пластических деформаций целиков.

Для улучшения условий проектирования новых и реконструкции старых рудников, а также способствования разработке новых методов работы на больших глубинах рекомендуем:

1. При проектировании размеры целиков рассчитывать по крайней мере одним из методов, перечисленных в пункте 1, а, и проверить по крайней мере одним из методов, перечисленных в пункте 1, б.

2. Закладывать реперы для измерения фактических деформаций целиков.

3. Проводить лабораторные исследования и натурные наблюдения для определения пластических деформаций и скорости пластических деформаций каменной соли.

Следовало бы пробурить на каком-либо месторождении большой мощности (например, Окна Мурешулуй) скважины $\varnothing 12\text{—}14''$ глубиной 2000—2500 м и замерять сужение их сечения на различных глубинах.

На основании этих замеров можно будет установить с достаточной для практики точностью предельную глубину применения разработки растворением, а также проверить ряд теоретических предположений о пластических деформациях каменной соли.

На основании этих же наблюдений можно будет выяснить возможность применения других вариантов разработки растворением, например варианта с обсадкой скважины на участке больших пластических деформаций, варианта с неподвижной колонной и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афендик Г. А. Применение оптического метода для выяснения распределения напряжений возле некоторых горных выработок. Горный журнал, 1938, № 5.
2. Давыдов С. С. Расчет и проектирование подземных конструкций. Государственное издательство строительной литературы, 1950.
3. Липкович С. М. и Якушевич А. И. О размерах целиков для предохранения выработок. Новые виды крепи и методы их расчета. Углетехиздат, 1953.
4. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. Углетехиздат, 1954.
5. Слесарев В. Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. Углетехиздат, 1948.
6. Тарасов Л. И. Справочник по горному делу. Подземные работы. Металлургиздат, 1952, отдел 1.
7. Цимбаревич П. М. Рудничное крепление. Углетехиздат, 1950.
8. Шевяков Л. Д. О расчете прочных размеров и деформаций целиков. Известия АН СССР, ОН, 1941, № 7—8 и 9.
9. Шевяков Л. Д. Основы теории проектирования угольных шахт. Углетехиздат, 1950.
10. Шевяков Л. Д. Разработка месторождений полезных ископаемых. Углетехиздат, 1953 и 1956.
11. Шерман Д. И. Упругая полуплоскость с прямолинейными разрезами. ДАН СССР, 1940, т. 26, № 7.
12. Шерман Д. И. Распределение напряжений в весоной полуплоскости, ослабленной двумя круговыми вырезами. Отчет по теме «Горное давление» за 1950 г., ИГД АН СССР.
13. Шерман Д. И. О напряжениях в весоной полуплоскости, ослабленной двумя круговыми отверстиями. Прикладная математика и механика, 1951, т. 15, вып. 3.
14. Шерман Д. И. К вопросу о напряженном состоянии междуканальных целиков. Упругая весоная среда, ослабленная двумя отверстиями эллиптической формы. Известия Акад. наук СССР, ОН, 1952, № 6—7.
15. Börgen H. Die Beziehungen zwischen Gebirgsdruck und Abbausicherheit unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim versatzlosen Steinsalzfirstenbau. Kali, 1929, nr. 18 und 19.
16. Bucky B. P. Stresses in mine Workings. Eng. and Mining Journal, nov. 1940.
17. Bucky B. P. New photoelastic pictures mine structure stresses by use of small-scale transparent models. Coal Age, nov. 1940.
18. Bucky B. P. Photoelasticity and its application to mine pillar and tunnel problems. Americ. Inst. M. E. Techn. Publ., 1940.
19. Busch. Über die Expansivkraft des Steinsalzes. Zeitschrift für prakt. Geologie, 1907.
20. Dorstewitz G. Spannungsoptische Untersuchungen als Beitrag zur Klärung von Gebirgsspannungen um bergmännische Hohlräume. Archiv für Bergbauliche Forschung, 1940, an 1, nr. 1, S. 3...25.

21. Fachkunde für den Kali — und Steinsalzbergbau. Volk und Wissen Volkseigner, Verlag, Berlin, 1952.
22. Fennner R. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes, Glückauf, 1938, nr. 32, S. 681—695, nr. 33, S. 705—15.
23. Führer F. A. Salzbergbau und Salinenkunde. Braunschweig, 1900.
24. Grenon A. Perforation mécanique et abatage des roches. L. Eyrolles, Paris, 1933.
25. Gruner M. L. E. Cours d'exploitations des mines. Methodes d'exploitation en carriere souterraine et. Editeur: Ecole Speciale des travaux publics, Paris, 1933, ed. II — e., III — e livre.
26. Haton de La Goupilliere, Cours d'exploitations des mines. Editeur Dunod, Paris, 1931.
27. Hütte. Editia AGIR, 1947, vol. I.
28. Kegel K. Über den Abbau von Kalisalzlagerstätten im grösseren Teufen. Glückauf, 1906, vol. 42.
29. Kegel K. Druckwirkungen im Bergbau. Glückauf, 1938, vol. 74, nr. 28.
30. Kegel K. Über die Berechnung der Tragfähigkeit von Bergfesten beim Kambau, insbesondere im Salzbergbau. Kali, verwandte Salze und Erdöl, 1942, nr. 11, nr. 12, S. 191—194.
31. Kegel K. Berg- und Aufbereitungstechnik. Geologische, und technologische Grundlagen des Bergbaus, Bergmännische Gebirgsmechanik, im Abbau bei festen und losen Gebirge. Verlag W. Knapp, Halle (Saale), 1942 und 1952, vol. III, T 2.
32. Kegel K. Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete der bermänischen Gebirgsmechanik. Abhandl. der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für technische Wissenschaften, Akademie — Verlag — Berlin, Jahrgang 1953, nr. 1.
33. Kegel K. Theorie der Druckfestigkeitsbestimmung von Gesteinen, insbesondere von Salzgesteinen. Bergakademie, 1957, nr. 8.
34. Kögler F. Taschenbuch für Berg — und Huttenleute. Verlag W. Ernst and Sohn, Berlin, 1929, S. 701.
35. Kühn P. Spannungszustand und Bruchgefahr im ungestörten Gebirge, Glückauf, 1931, vol. 67, nr. 32, S. 1033... 1037.
36. Kühn P. Betrachtungen über die Gebirgsdruckfrage, Glückauf, 1931, vol. 67, nr. 48, S. 1477—1484.
37. Kühn P. Spannungs — und Strukturzustand des Gesteins im ungestörten Gebirge, Glückauf, 1933, vol. 69, nr. 25, S. 560—563.
38. Müller O. Untersuchungen an Karbongesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen. Glückauf, 1930, vol. 66, nr. 47—48.
39. Spackeler G. Kalibergbaukunde, Verlag von W. Knapp, Halle (Saale), 1925 und 1948.
40. Spackeler G. Lehrbuch des Kali — und Steinsalzbergbaues. Verlag W. Knapp, Halle (Saale), 1950.
41. Stamatiu M. Essais sur la résistance du sel gemme de Slanic. Annales, des mines de Roumanie, 1934, nr. I.
42. Stamatiu M. Quelques remarques sur la plasticité du sel gemme. Bull. Sect. Scient. Acad. Roum., 1936, t. XVII, nr. 9—10.
43. Stamatiu M. Beiträge zur Klärung einiger Abbauprobleme bei den rumänischen Salzgruben, Habilitationsschrift, Bergakademie Freiberg. Imprimeria nationala, Bucuresti, 1937.
44. Stamatiu M. Problema dimensionarii camerelor de exploatare la minele de sare din România. Imprimeria Nationala, Bucuresti, 1939; Bul. Soc. Politehnice din România, 1939, vol. LIII, nr. 6—8.
45. Stamatiu M. Istoricul metodelor de exploatare a zacamintelor de sare din România. Anal. Acad. Rom. Mem. Sect. stint, 1943, ser. III, t. XVIII, mem. 16.

46. S t a m a t i u M. Repartizarea eforturilor litostatice in jurul lucrarilor subterane executate in medii elastice plastice si dezagregate. Institutul pentru stiinta si tehnica din Romania, anul academic 1947—1948, nr. 4.

47. S t a m a t i u M. Influenta formei si a marimii epruvetelor asupra rezistentei de rupere la compresiune a sarii geme romînesti. Comunicarile Academiei R. P. R., 1951, t. I, nr. 2.

48. S t a m a t i u M. Influenta marimii epruvetelor in forma de cuburi asupra rezistentei de rupere la compresiune a citorva roci naturale si artificiale. Bul. stiint. Acad. R. P. R., Sectiunea de stiinte biologice, agronomice, geologice si geografice, t. IV, nr. 2, 1952.

49. S t a m a t i u M. Cercetari referitoare la influenta solutiilor saturate de clorura de sodiu asupra rezistentei la eforturi mecanice a sarii geme de la salina Ocna Muresului. Rev. Minelor ASIT 1956, nr. 9, p. 399—413; Bul. stiint. Acad. R. P. R.; Sectia de geologie si geografie, t. II, nr. 1, 1957.

50. Tournaire. Des dimensions á donner aus piliers des carrières et des pressions aux quelles les terrains sont soumis dans les profondeurs. Annales des mines, 8-e serie, 1884, t. V, 1886, t. VII.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчика	Стр. 3
Введение	5

Часть первая

Теория расчета целиков

Глава I. Данные, необходимые для расчета	7
Величина и распределение напряжений в целике	—
Способность материала целика сопротивляться различным видам возникающих в нем усилий	10
Вид и величина деформаций опорных целиков	14
Глава II. Методы и формулы для проверки и расчета опорных целиков	17
Методы, основанные на гипотезе равномерного распределения напряжений в целике и постоянстве сопротивления раздавливанию	—
Методы расчета, основанные на гипотезе равномерного распределения напряжений в целиках и зависимости сопротивления сжатию от формы и размеров целиков	27
Методы расчета, основанные на гипотезах неравномерного распределения напряжений в целиках, и параболы давления	34
Методы расчета, основанные на теории упругости	39
Эмпирические и полуэмпирические методы, установленные немецкой, американской и английской горной практикой	46

Часть вторая

Расчет и проверка целиков на соляных рудниках РНР

Глава I. Рудник им. 23 августа месторождения Окна Мурешулуй . . .	48
Общие сведения о руднике	—
Физико-механические характеристики каменной соли и покрывающих пород	50
Глава II. Рудники «Старая Молдавия» и «Новая Молдавия» месторождения Тыргу Окна	51
Общие сведения	—
Физико-механические свойства каменной соли и покрывающих пород месторождения Тыргу Окна	53
Глава III. Проверка на практике методов расчета и проверочных формул, предложенных различными авторами	55
Рудник им. 23 августа	—
Рудник «Старая Молдавия»	67
Рудник «Новая Молдавия»	74

	Стр.
Глава IV. Расчет вертикальных деформаций целиков	78
Рудник им. 23 августа	—
Рудник «Старая Молдавия»	79
Глава V. О предельной глубине разработки полезного ископаемого камерно-столбовой системой	80
Глава VI. О выборе варианта камерно-столбовой системы в зависимости от глубины разработок	82
Глава VII. Расчет целиков при разработке каменной соли растворением в камерах цилиндрической формы	84
Общие сведения	—
Метод проверки М. Стаматиу	85
Метод проверки, предложенный Главным управлением по эксплуатации департамента неорганической химии Министерства нефтяной и химической промышленности	88
Метод проверки Г. де Ля Гупнера	89
Расчет конструктивных элементов этажа	90
О выборе размеров опорных целиков при разработке растворением в зависимости от глубины разработок	95
Выводы и предложения	102
Литература	104

Стаматиу Михаил РАСЧЕТ ЦЕЛИКОВ НА СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ

Перевод Махо Г. П.

Отв. редактор К. В. Руппенейт
Техн. редактор И. С. Мещанкина.

Редактор издательства А. Х. Славоросов
Корректор Е. В. Мухина

Сдано в набор 26/X 1962 г. Подписано в печать 22/I 1963. Формат бумаги 60 x 90¹/₁₆

Печ. л. 6,75. Уч.-изд. л. 6,7. Тираж 1000 экз.

Изд. № 499. Инд. 1/8-в. Цена 47 коп. Заказ № 2542

Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу

ГОСГОРТЕХИЗДАТ
Москва, Грузинский вал, д. 35

Харьковская типография Госгортехиздата. Харьков, ул. Энгельса, 11

ЗАМЕЧЕННАЯ ОПЕЧАТКА

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
78	4 сверху	36 мм	36 м

М. Стаматину. «Расчет целиков на соляных рудниках»