

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский государственный технический университет»**

Е.В. Челпанова

**РАСЧЕТ МНОГООПОРНОЙ ПОРОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ИЗ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ ГРУПП ЛЕНТОЧНЫХ ЦЕЛИКОВ,
ОБЛАДАЮЩИХ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ**

**Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебно-методического пособия**

**Издательство
Пермского государственного технического университета
2007**

УДК 622.83

Ч-36

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Ю.А. Кашников*;
доктор технических наук, профессор *С.С. Андрейко*

Челпанова, Е.В.

Ч-36 Расчет многоопорной породной конструкции из чередующихся групп ленточных целиков, обладающих разной прочностью: учебно-метод. пособие / Е.В. Челпанова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 29 с.

Изложено инженерное решение задачи определения несущей способности многоопорной породной конструкции из чередующихся групп ленточных целиков, обладающих разной прочностью. Описаны геомеханические процессы, происходящие при управлении кровлей разнопрочными целиками. Отмечено, что в результате этих процессов в породах кровли пласта самопроизвольно формируется несущая система, появление которой либо снижает скорость оседания земной поверхности, либо уменьшает влияние выработанного пространства на величину конечного оседания. На основе научной концепции о суперпозиции главных напряжений, обуславливающих прочность ленточного целика на сжатие, разработана аналитическая модель предельного состояния целика с помощью паспорта длительной прочности горной породы.

Использование пособия в учебном процессе позволит расширить тематику курсовых и дипломных проектов, повысит профессиональный уровень студентов.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению «Горное дело».

УДК 622.83

© ГОУ ВПО «Пермский государственный
технический университет», 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Многоопорная породная конструкция из чередующихся групп ленточных целиков с разной прочностью	5
1.1. Обеспечение возможности уменьшения влияния выработанного пространства на оседание земной поверхности	5
1.2. Предотвращение процесса сводообразования в кровле пласта	6
1.3. Обеспечение возможности уменьшения скорости оседания земной поверхности	7
1.4. Распространение зоны разрушенных пород кровли при давлении на самопроизвольно образовавшиеся целики, превышающем их предел длительной прочности	7
1.5. Решение проблемы расчета многоопорной породной конструкции и основная геомеханическая задача	8
2. Разработка аналитической модели предельного состояния ленточных целиков	9
2.1. Краткие сведения о факторах, влияющих на прочность солевого целика	9
2.2. Принятая научная концепция влияния боковых напряжений на изменение прочности ленточного целика	9
2.3. Методика построения паспортов прочности горной породы при разных значениях коэффициентов ее нагружения	11
2.4. Методика определения условно-мгновенной прочности ленточного целика с учетом многообразия влияющих на нее факторов	14
2.5. Взаимосвязь между боковыми напряжениями и формой ленточного целика	17
2.6. Аналитическое представление разработанной математической модели предельного состояния ленточного целика	18
3. Методика расчета параметров разработки пластов	18
4. Пример расчета параметров разработки пласта	22
5. Список использованной литературы	24

Введение

Для повышения эффективности ведения очистных работ на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей могут быть использованы технологические решения [1–10], направленные: на увеличение извлечения руды из пластов и уменьшение объема закладочных работ как в краевой части мульды сдвижения, так и в плоской части ее дна; повышение устойчивости обнажений пород кровли; ограничение глубины распространения зоны трещинообразования в кровле, происходящего в процессе разрушения междукамерных целиков; снижение вероятности газодинамических явлений (ГДЯ) и уменьшение скорости оседания земной поверхности. Решения сводятся к управлению горным давлением разнопрочными опорными породными конструкциями.

Известные инженерные методы расчета не позволяют вычислять несущую способность сложных породных опорных конструкций. Это и определило необходимость выполнения геомеханических исследований, направленных на решение актуальной задачи – установление несущей способности многоопорной породной конструкции, представленной последовательно чередующихся групп ленточных целиков, отличающихся значениями условно-мгновенной (кратковременной) прочности на сжатие. Исследования [11–12] выполнялись в рамках бюджетных и хоздоговорных НИР, полученные результаты обсуждались на конференциях [13–17], публиковались в периодических изданиях [18–19]. Они имеют важное практическое значение, например позволяют повысить безопасность ведения горных работ при складировании отходов обогащения калийных руд в отработанные камеры [20].

Научная новизна изложенного в пособии подхода заключается: в обосновании возможности использования паспорта условно-мгновенной прочности для определения паспорта длительной прочности горной породы; в установлении аналитической зависимости, характеризующей предельное состояние ленточных целиков при разных значениях коэффициента нагружения их горной породы, а также в разработке способа оценки влияния комплекса различных факторов (форма кровли камеры,

соотношение ширины целика и ширины камеры, расположение глинистых прослоев в пределах целика) на прочность ленточного целика.

Научные положения, приведенные в пособии, разработаны на уровне изобретения, некоторые из них защищены патентами РФ [21–27].

В составлении подраздела 2.4 участвовал доцент кафедры РМПИ *В.Г. Артемов*.

1. Многоопорная породная конструкция из чередующихся групп ленточных целиков с разной прочностью

1.1. Обеспечение возможности уменьшения влияния выработанного пространства на оседание земной поверхности

Выработанное пространство очистных камер не влияет на оседание подработанной толщи горных пород, если кровля камер устойчивая (ширина камер не превышает ширины предельно устойчивого пролета), а целики не разрушаются (напряжения, возникающие в них, не превышают предела их длительной прочности). При неустойчивой кровле очистных камер, например после разрушения междуходовых целиков, породы кровли обрушаются и в ней образуются своды. Таким образом, в кровле разрабатываемого пласта самопроизвольно формируется несущая система, своеобразными камерами которой служат своды, а опорными ленточными целиками – горный массив, находящийся между этими сводами. Условием формирования несущей системы во вмещающих породах является управление кровлей чередующимися группами (блоками) целиков с разной прочностью. Очевидно, что только при таком взаиморасположении разнопрочных целиков появляются в кровле пласта разобщенные своды над блоками с разрушившимися целиками, обладавшими меньшей прочностью. Исключение влияния полостей сводов на оседание земной поверхности достигается путем увеличения ширины блоков целиков с большим значением

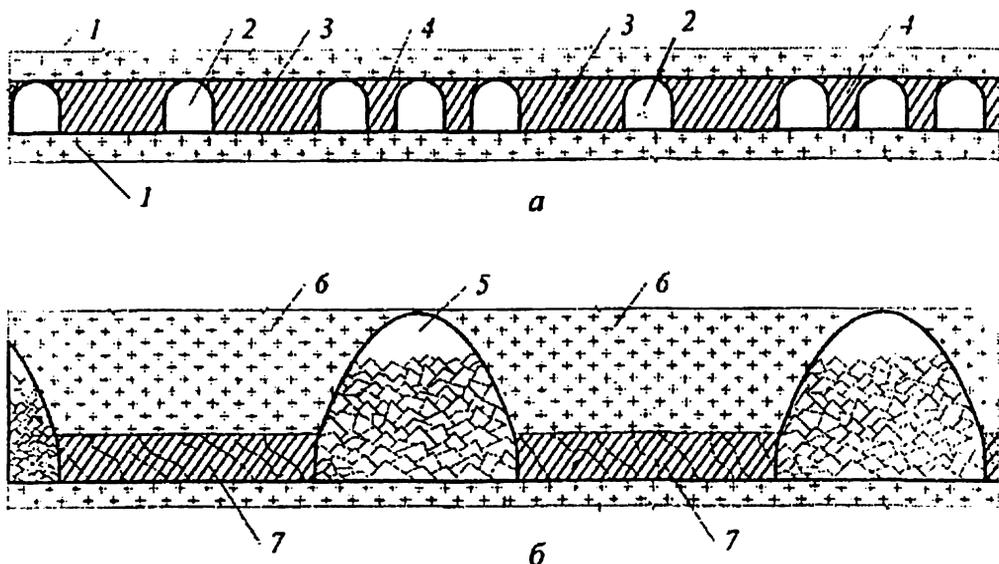


Рис. 1. Самопроизвольное формирование несущей системы во вмещающих породах кровли разрабатываемого пласта при величине давления на ее целики, не превышающем предела их длительной прочности: *а, б* – ситуация до разрушения ленточных целиков и после их разрушения; *1* – вмещающие породы; *2* – очистные камеры; *3* – междукамерные целики; *4* – междуходовые целики (менее прочные, чем междукамерные); *5* – полость свода; *6* – междусводовые ленточные целики, сформировавшиеся в кровле разрабатываемого пласта; *7* – разрушившиеся междукамерные целики

прочности до величины, при которой давление на формирующиеся в кровле междусводовые целики не превысит их предела длительной прочности [22]. Все вышеописанное поясняется рис. 1.

1.2. Предотвращение процесса сводообразования в кровле пласта

Несущая способность породной конструкции, представляющей чередующиеся группы ленточных разнопрочных целиков, по сравнению с несущей способностью равнопрочных, ширина которых равна средней ширине разнопрочных, значительно больше [28;29]. При управлении горным давлением разнопрочными целиками нежелательный процесс сводообразования, обусловленный, например, строением водозащитной толщи, предотвращается, если после разрушения междуходовых целиков горное давление на междукамерные целики равняется их условно-мгновенной прочности [24].

1.3. Обеспечение возможности уменьшения скорости оседания земной поверхности

При управлении подработанной толщей горных пород разнопрочными целиками и формировании в кровле пласта между сводовых целиков, горное давление на которые превышает предел их длительной прочности, процесс оседания земной поверхности происходит в две стадии: вначале в период разрушения междукламерных целиков, а затем в период разрушения между сводовых целиков, образовавшихся в породах кровли пласта. За счет увеличения времени процесса полного заполнения выработанного пространства породами разрушенных целиков пласта и целиков в кровле, и уменьшается скорость оседания земной поверхности. Вследствие этого повышается безопасность подработки водозащитной толщи (ВЗТ) и создаются условия для увеличения извлечения руды из разрабатываемых пластов.

1.4. Распространение зоны разрушенных пород кровли при давлении на самопроизвольно образовавшиеся целики, превышающем их предел длительной прочности

Если нагрузка на между сводовые целики кровли больше их предела длительной прочности, то стадия активных сдвижений разрывается во времени. При этом процесс оседания при разработке одного пласта протекает так же, как и при разработке двух сближенных пластов с разными коэффициентами нагружения целиков. Первая стадия активных сдвижений происходит в результате разрушения междукламерных целиков, а вторая – в результате разрушения между сводовых целиков кровли. После обрушения пород со стенок между сводового целика увеличивается ширина пролета кровли в верхней части свода, что вызывает снижение его устойчивости и последующее обрушение пород. Последовательное чередование таких обрушений сопровождается увеличением размеров каждого из сводов в горизонтальном и вертикальном направлениях. Таким образом между сводами формируется неподверженный деформациям изгиба ленточный целик с трапециевидальной формой поперечного сечения, который и воспринимает вес налегающей толщи горных пород (рис. 2).

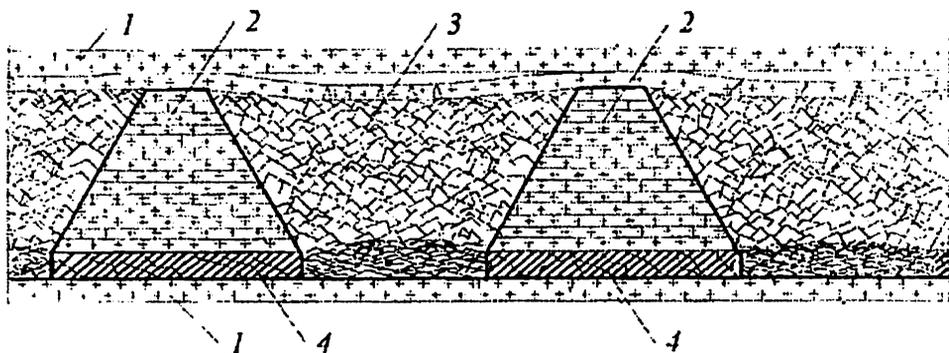


Рис. 2. Распространение зоны разрушенных пород кровли при давлении на самопроизвольно образовавшиеся междусводовые целики, превышающем предел их длительной прочности: 1 – вмещающие породы; 2 – междусводовые ленточные целики, сформировавшиеся в кровле разрабатываемого пласта; 3 – разрушившиеся породы кровли; 4 – разрушившиеся междукамерные целики

Волнообразное оседание пород кровли, как и зона ее разрушенных пород, заканчивается на той глубине, где верхняя часть трапецеидальных междусводовых целиков приходит в запредельное состояние [30].

1.5. Решение проблемы расчета многоопорной породной конструкции и основная геомеханическая задача

Определение размеров многоопорной породной конструкции осуществляется с помощью метода расчета целиков по допускаемым напряжениям с введением в его аналитическое описание зависимостей, отражающих: влияние на прочность целиков коэффициента их нагружения, проявление так называемых эффектов концевых условий [31] и отсутствие возможности у них деформироваться по продольной оси. Воздействующая на целики нагрузка должна равняться их результирующей несущей способности. В этом случае

$$\gamma H [n_b b + n_B B + (n_b + n_B) a] = [\psi(B/h; k_H) B n_B + \psi(b/h; k_H) b n_b] \sigma_0, (1)$$

где γ – объемный вес пород налегающей толщи;

H – глубина залегания разрабатываемого пласта;

n_b – количество междуходовых целиков;

- b – ширина междуходового целика;
 n_B – количество междукамерных целиков;
 B – ширина междукамерного целика;
 a – ширина камерного хода;
 h – высота целиков;
 k_n – коэффициент нагружения породы целика;
 σ_0 – прочность горной породы;
 ψ – функция, отражающая зависимость прочности ленточного целика от коэффициента нагружения горной породы k_n и значения отношения его ширины к высоте b/h (B/h).

Совокупность зависимостей представляет математическую модель предельного состояния ленточных целиков (раздел 2).

2. Разработка аналитической модели предельного состояния ленточных целиков

2.1. Краткие сведения о факторах, влияющих на прочность солевого целика

На несущую способность ленточного целика, кроме прочности входящей в его состав горной породы, влияют два *независимых* друг от друга фактора:

- отсутствие у целика возможности деформироваться по продольной оси;
- контактные условия взаимодействия как между солевыми слоями и глинистыми прослойками целика, так и между опорными поверхностями целика и вмещающими его соляными породами. Влияние этого фактора, так называемого эффекта концевых условий, на прочность зависит от размеров целика: его высоты и ширины опорной поверхности.

2.2. Принятая научная концепция влияния боковых напряжений на изменение прочности ленточного целика

В условиях рудников Верхнекамского месторождения калийных солей разрабатываемые пласты соляных пород имеют довольно сложное строение. Они могут быть представлены кристаллами различных минералов и примесями; могут включать в себя полости, заполненные газом с высоким давлением, или

трещины, содержащие галит, сильвинит или карналлит. Солевой массив, в особенности в кровле пластов, представлен слоями переменной мощности и складчатости, разделенными иногда глинистыми прослоями.

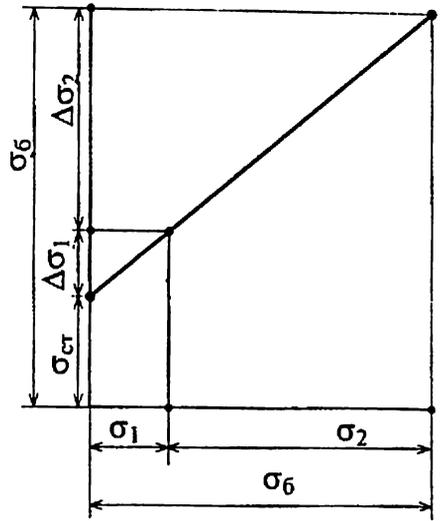
Между опорной поверхностью целиков и вмещающими их породами может сохраняться естественное природное сцепление. В этом случае поперечному расширению целиков препятствуют силы, возникающие при совместном деформировании участков слоя кровли пласта, ширина одного из которых равна ширине камеры, а другого, лежащего на опорной поверхности целика, — ширине этого целика.

При отсутствии сил сцепления в результате скольжения опорной поверхности целика (при развитии его поперечных деформаций) по поверхности контактирующего с ней слоя породы кровли возникает сила трения, которая и противодействует развитию поперечных деформаций в опорных поверхностях целиков. Это приводит к созданию выпуклой бочкообразной формы целиков, вызывает возникновение сил бокового распора и проявляется в увеличении прочности. Наличие глинистых прослоев и их выдавливание из целика могут способствовать развитию поперечных деформаций и проявляться в уменьшении его прочности.

Оценить комплексное влияние многообразия перечисленных факторов на прочность ленточного целика и ее зависимость от эффектов концевых условий можно по проявлению геомеханических процессов, в частности по скорости оседания земной поверхности, связанной с деформациями целиков, возникающими в результате воздействия на эти целики горного давления.

С целью установления влияния боковых напряжений на изменение прочности ленточного целика принята научная концепция о суперпозиции главных напряжений, обуславливающих прочность на сжатие этого целика, одно из которых вызвано эффектами концевых условий, а другое — отсутствием возможности деформироваться по продольной оси. Она позволила для оценки комплексного влияния многообразия различных факторов на прочность на сжатие ленточного целика использовать паспорт прочности соляной породы. Вместо ленточного целика рассматривается равный ему по прочности столбчатый, на который воздействует боковое давление (рис. 3).

Рис. 3 Отражение взаимосвязей между слагаемыми прочности ленточного целика и составляющими бокового напряжения, приводящими к изменению его прочности: σ_0 – осевое напряжение; σ_6 – боковое напряжение; σ_1 – составляющая бокового напряжения целика, обусловленная отсутствием возможности у него деформироваться по продольной оси; σ_2 – составляющая бокового напряжения целика, обусловленная взаимодействием его опорной поверхности с вмещающими породами; σ_0 – прочность горной породы, $\Delta\sigma_1$ – изменение прочности из-за появления напряжений σ_1 ; $\Delta\sigma_2$ – изменение прочности из-за появления напряжений σ_2 ; $\sigma_{ст}$ – условно-мгновенная прочность столбчатого целика, у которого $h/d = 2$



Форма рассматриваемого столбчатого целика исключает влияние на его прочность эффекта концевых условий. Согласно результатам исследований механических свойств соляных пород, выполненных Г.Н. Кузнецовым [32], отношение высоты к ширине у таких породных конструкций равно двум.

2.3. Методика построения паспортов прочности горной породы при разных значениях коэффициентов ее нагружения

Под коэффициентом нагружения понимается отношение появляющегося осевого напряжения к условно-мгновенной прочности столбчатого целика или образца горной породы, у которых значение отношения $b/h = 0,5$. Паспорт прочности характеризует варианты сочетаний касательных и нормальных напряжений, возникновение которых приводит горную породу в предельное, предшествующее разрушению состояние (рис. 4). По результатам исследований [33] построены паспорта прочности для соляных пород.

Это состояние в данном пособии представляется в виде сочетаний главных (осевых и боковых) напряжений (рис. 5).

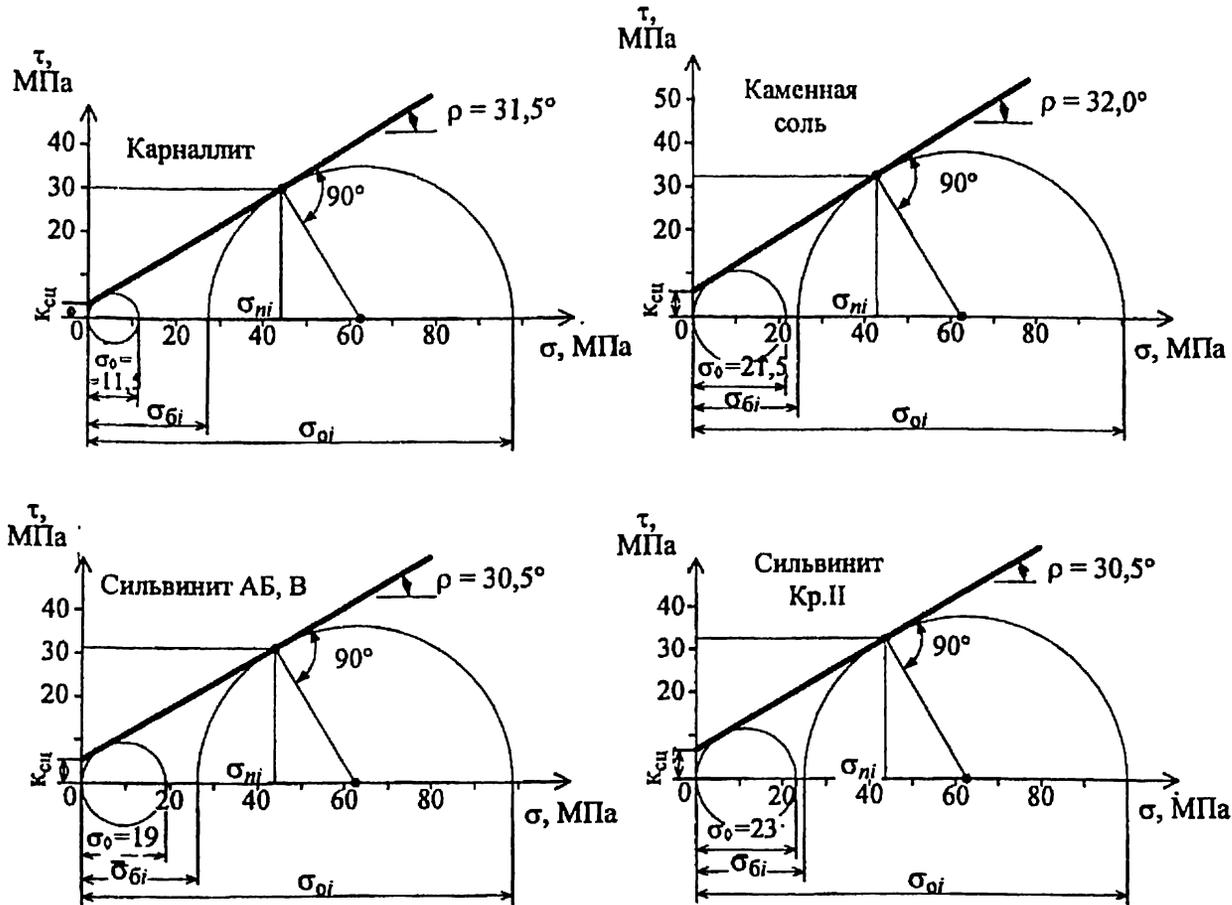


Рис. 4. Паспорт прочности горной породы и определение взаимосвязи главных напряжений по координатам точек σ и τ графика этого паспорта: $k_{сш}$ – напряжение чистого сдвига; τ – касательные напряжения; σ – нормальные напряжения; ρ – угол внутреннего трения

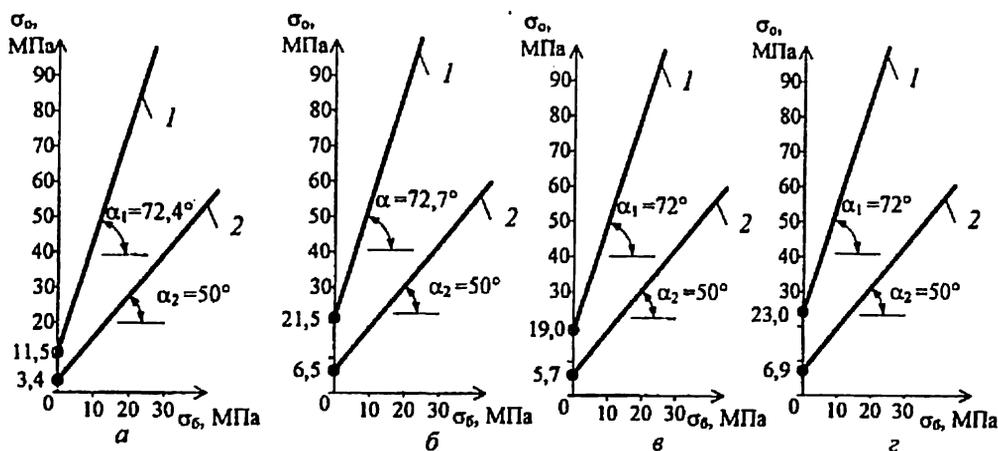


Рис. 5. Графики паспортов условно-мгновенной (кр. 1) и предельно длительной (кр. 2) прочности соляных пород: а – для карналлита; б – для каменной соли; в – для сильвинита пластов АБ и В; г – для сильвинита пласта Кр. II

Если при выполнении расчетов, связанных с построением паспорта прочности горной породы, используются компоненты напряжений, установленные при стандартной скорости нагружения, то его называют паспортом кратковременной или условно-мгновенной прочности. При условно-мгновенном значении прочности коэффициент нагружения горной породы теоретически равен единице. Очевидно, что и для меньших значений коэффициента нагружения горной породы можно начертить графики паспортов прочности, каждый из вариантов сочетаний напряжений которых функционально связан либо с временем сохранения несущей способности, либо со скоростью деформирования образца горной породы в осевом направлении. Принято допущение, что точка пересечения графиков паспортов $\tau_m(\sigma_n)$ и $\tau_\infty(\sigma_n)$ находится на оси абсцисс; при этом предельно длительная прочность составляет 30 % от величины условно-мгновенной. Графики паспортов условно-мгновенной и временных прочностей представляются в безразмерных координатах. Это позволяет значениями оси ординат отражать величину не только относительного осевого напряжения, но и коэффициента нагружения горной породы k_n .

Угловые коэффициенты графиков определяются значениями тангенсов углов их наклона к оси абсцисс. При этом графики являются пучком лучей, исходящих из одного и того же полюса. В аналитическом виде они аппроксимируются уравнением

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_o} = k_n + (0,5 + 2,5k_n) \frac{\sigma_b}{\sigma_o}. \quad (2)$$

2.4. Методика определения условно-мгновенной прочности ленточного целика с учетом многообразия влияющих на нее факторов

Исходными данными для определения прочности ленточного целика в функции от значения отношения его ширины к высоте являются: воздействующее на него горное давление, скорость оседания земной поверхности в месте расположения ленточного целика; паспорт кратковременной прочности горной породы; зависимость коэффициента нагружения горной породы от скорости ее деформирования.

Методика направлена на определение условно-мгновенной прочности ленточного целика в функции от значения отношения его ширины к высоте при учете комплексного влияния на эту прочность многообразия факторов, указанных в подразделе 2.2.

Рассмотрим, как определяется уравнение, характеризующее зависимость условно-мгновенной прочности ленточного целика от значения отношения его ширины к высоте, на примере средних значений параметров вариантов разработки солевых пластов, описанных в работе [34] (отношение ширины целика к высоте $b/h = 0,8$; коэффициент нагружения горной породы $k_n = 0,3$; отношение горного давления, действующего на опорную поверхность, к прочности горной породы (q/σ_o) равно 0,68).

Сначала вычисляется коэффициент нагружения горной породы в краевой части ленточного целика по величине скорости оседания земной поверхности. Для этого используется зависимость $k_n(\epsilon')$, установленная с учетом данных, приведенных в работе [35] доцентом Пермского государственного технического университета В.Г. Артемовым.

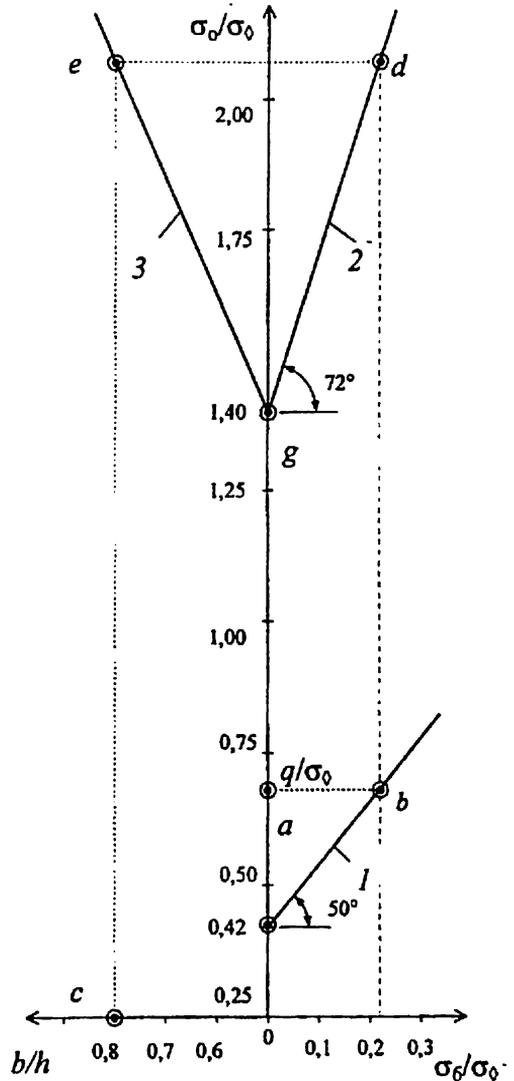
$$k_{н.л} = \frac{16 - |\lg \epsilon'|}{1,4(16 - \lg \epsilon^*)}, \quad (3)$$

где $k_{н.л}$ — коэффициент нагружения ленточного целика;

ϵ' — скорость стационарной ползучести;

ϵ^* — скорость стационарной ползучести, при которой коэффициент нагружения образцов принят равным единице, $\lg \epsilon^* = 4$.

Рис. 6. К определению условно-мгновенной прочности ленточного целика в функции от боковых напряжений: q/σ_0 — величина давления на ленточный целик в относительных единицах; 1 — график зависимости осевого давления от бокового, обусловленного концевыми эффектами, при коэффициенте нагружения $k_{н.л} = 0,3$; 2 — график паспорта условно-мгновенной прочности; 3 — график зависимости условно-мгновенной прочности от параметра, характеризующего форму целика, — отношения b/h



Затем строятся графики, отражающие зависимости осевого напряжения от бокового (рис. 6).

Определяется величина бокового напряжения σ_{6i}/σ_0 , при которой в результате воздействия на ленточный целик горно-

го давления $q/\sigma_0 = 0,68$ коэффициент нагружения его породы достигает значения $k_{нi} = 0,3$. Графически устанавливается, что σ_{bi}/σ_0 равняется 0,22.

Для этого из точки a , находящейся на оси ординат, где значение $\sigma_0/\sigma_0 = q/\sigma_0$, проводится прямая, параллельная оси абсцисс, до пересечения с графиком 1 (точка b), затем из точки b проводится прямая параллельно оси ординат, точка пересечения которой с осью абсцисс (абсцисса равна $\approx 0,22$) и является искомой величиной бокового напряжения.

Устанавливается условно-мгновенная прочность на сжатие ленточного целика, величина боковых напряжений у которого в относительных единицах равна 0,22. Для этого из точки b параллельно оси ординат проводится прямая до пересечения с графиком 2 (точка d). Значение ординаты точки пересечения точки d равняется искомой условно-мгновенной прочности ленточного целика в относительных единицах: $\sigma_0/\sigma_0 = 2,07$.

Определяется месторасположение одной из точек, принадлежащей графику, отражающему зависимость условно-мгновенной прочности ленточного целика от значения отношения его ширины к высоте. Для этого из точек c , значение абсциссы которой равно отношению ширины ленточного целика к его высоте, и d проводятся параллельные координатным осям прямые. Точка пересечения этих прямых e и является одной из точек, совокупность которых образует график искомой функции $\sigma_0/\sigma_0 (b/h)$.

Координаты второй точки этого графика – точки g определены для ленточного целика с $b/h = 0,5$. Отсутствие влияния концевых эффектов позволяет, используя известную зависимость [36], установить ординату этой точки:

$$\begin{aligned} \sigma_0/\sigma_0 &= 1,25 k_m (0,654 + 0,69 b/h) = \\ &= 1,25 \cdot 1,12 (0,654 + 0,69 b/h) = 1,4, \end{aligned} \quad (4)$$

где k_m – коэффициент, отражающий влияние на прочность целика масштабного эффекта, $k_m = 1,12$.

Сохранение прямолинейности графиков σ_0/σ_0 от b/h в широком диапазоне влияния на прочность эффекта концевых условий позволило аппроксимировать график 3 уравнением

$$\begin{aligned} \sigma_o/\sigma_0 &= 1,4 + \frac{2,07 - 1,4}{0,8 - 0,5} (b/h - 0,5) = \\ &= 1,4 + 2,23(b/h - 0,5). \end{aligned} \quad (5)$$

2.5. Взаимосвязь между боковыми напряжениями и формой ленточного целика

В соответствии с принятой концепцией прочность ленточного целика, у которого $b/h > 0,5$, равняется прочности ленточного целика, у которого $b/h = 0,5$, если он претерпевает воздействие бокового давления, вызывающего появления напряжения σ_b . Таким образом, между параметрами b/h и σ_b существует функциональная связь, которая позволяет заменить ось абсцисс σ_b/σ_0 осью абсцисс b/h .

Это преобразование поясняется рис. 7. Графики 1 и 2 взяты из рис. 6.

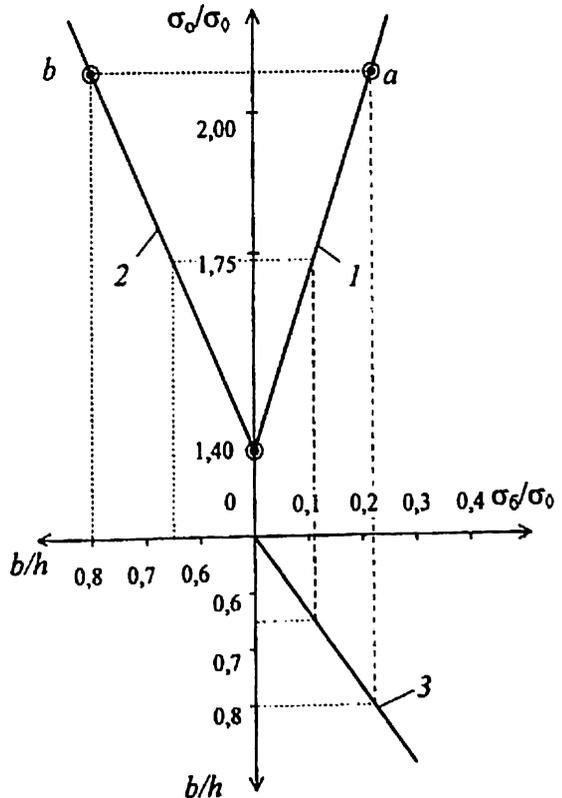


Рис. 7. Пояснение к построению графика зависимости σ_b/σ_0 от b/h : 1 — график условно-мгновенной прочности соляной породы; 2 — прочность ленточного целика в функции от значения отношения его ширины к высоте; 3 — график зависимости бокового напряжения от формы целика b/h

С помощью графиков 1 и 2 устанавливаются координаты точек a и d и определяется уравнение, аппроксимирующее график 3.

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_0} = 0,73(b/h - 0,5). \quad (6)$$

2.6. Аналитическое представление разработанной математической модели предельного состояния ленточного целика

Математическая модель в графическом отображении представляет собой пучок лучей, исходящих из одного и того же полюса. В аналитическом виде она определяется подстановкой уравнения (6) в уравнение (2) с учетом коэффициента ленточности целика и коэффициента, отражающего влияние масштабного фактора:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_0} = k_n \cdot 1,25 \cdot 1,12 + (0,5 + 2,5k_n)[0,73(b/h - 0,5)]. \quad (7)$$

3. Методика расчета параметров разработки пластов

При заданном значении k_n предельное состояние междукамерных целиков

$$\frac{\gamma H [n_b b + (n_b + 1)a + n_B B + (n_B - 1)a]}{n_B B \sigma_{ц} \varphi(b/h)} =$$

$$= \frac{\gamma H [n_b b + (n_b + 1)a + n_B B + (n_B - 1)a]}{n_B B \sigma_{ц} \{1,4k_n + (0,5 + 2,5k_n)[0,73(B/h - 0,5)]\}} = 1, \quad (8)$$

где γ – объемный вес пород налегающей толщи;

H – глубина разработки;

n_b – количество междуходовых целиков;

n_B – количество междукамерных целиков;

$\sigma_{ц}$ – агрегатная прочность пород разрабатываемого пласта.

Расчет выполняется по схеме, показанной на рис. 8. При $k_n = 0,3$ предельное состояние междусводовых целиков

$$\frac{\gamma H [n_b b + (n_b + 1)a + n_B B + (n_B - 1)a]}{[n_B B + (n_B - 1)a] \sigma_k \varphi \left(\frac{n_B B + (n_B - 1)a}{0,7 [n_b b + (n_b + 1)a - a_0]} \right)} =$$

$$= \frac{1}{[n_B B + (n_B - 1)a] \sigma_k} \times$$

$$\times \frac{\gamma H [n_b b + (n_b + 1)a + n_B B + (n_B - 1)a]}{\left\{ 1,4 k_H + (0,5 + 2,5 k_H) \left[0,73 \left(\frac{n_B B + (n_B - 1)a}{0,7 [n_b b + (n_b + 1)a - a_0]} - 0,5 \right) \right] \right\}}, \quad (9)$$

где σ_k – агрегатная прочность пород, слагающих междусводо-
вый целик;

k_H – коэффициент нагружения породы целиков.

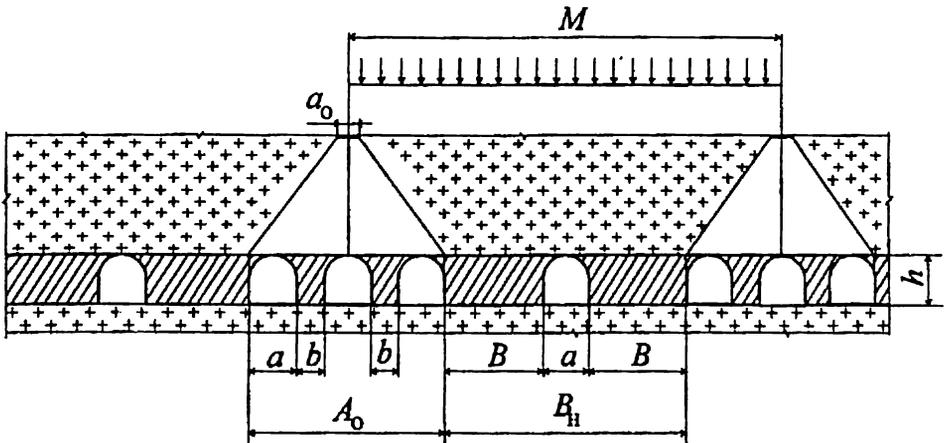


Рис. 8. Расчетная схема: a_0 – ширина устойчивого пролета кровли; M – ширина выделенного расчетного блока; h – вынимаемая мощность пласта; B – ширина междукammerного целика; a – ширина камерного хода; b – ширина междуходового целика; B_H – расчетная ширина междусводового целика; A_H – расчетная ширина свода по низу

Числители обоих уравнений одинаковы – выражают величину нагрузки, действующей на выделенный расчетный блок. После приравнивания зависимостей, отражающих величину этой нагрузки, получается выражение

$$n_B B \sigma_{ц} \{1,4 k_H + (0,5 + 2,5 k_H) [0,73(B/h - 0,5)]\} = [n_B B + (n_B - 1)a] \sigma_k \times \\ \times \left\{ 1,4 k_H + (0,5 + 2,5 k_H) \left[0,73 \left(\frac{n_B B + (n_B - 1)a}{0,7[n_b b + (n_b + 1)a - a_0]} - 0,5 \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

Задаемся формой междукамерного целика, удовлетворяющей двум условиям:

- формированию в центральной части целика зоны всестороннего сжатия, например при $B/h = 2$, $B = 2h$;
- сохранению безопасности подработки ВЗТ.

$$B \geq \frac{0,9S - a[\eta]}{[\eta]}, \quad (11)$$

где $[\eta]$ – допустимое оседание земной поверхности, определяемое по методике [36];

S – площадь камерного хода.

Задаемся формой междуходового целика, при которой не возникает косоугольного изгиба и отсутствует влияние на прочность эффекта концевых условий, например $b/h = 0,5$.

Задаемся количеством широких целиков так, чтобы после их разрушения под междусводовым целиком в результате воздействия опорного давления на его краевые части между ними сформировалась зона всестороннего сжатия. Для этого достаточно того, чтобы обнажения разрушенного пласта находились на расстоянии друг от друга, исключающем их взаимовлияние. Оно равняется $5-6 h$; в расчетах принято равным 5 .

В соответствии с рассматриваемой расчетной схемой

$$\frac{B n_B + (n_B - 1)a}{h} \geq 5.$$

Исходя из этого условия

$$n_B \geq \frac{5h + a}{B + a}. \quad (12)$$

Значения параметров B , n_B и b , а также исходные данные: $\sigma_{ц}$, σ_k , a , a_0 и h – подставляются в уравнение (10) и определяется

значение n_b . Его величина округляется до целого числа. Рассчитывается высота развития свода:

$$h_{св} = 0,7[n_b b + (n_b + 1)a - a_0]. \quad (13)$$

Влияние свода на безопасность подработки ВЗТ оценивается путем сопоставления суммарной мощности слоев ВЗТ, не разрушенных в результате прогиба и развития свода, с ее минимально допустимым значением; определяется по методике [36].

При неравномерной выемке руды величина конечных оседаний земной поверхности зависит от параметров отработки пласта под междусводовым целиком, а при равномерной – от суммарной величины сечения очистных камер, находящихся в пределах рассматриваемого расчетного блока. Исходя из этого оценка эффективности способа управления горным давлением при неравномерной выемке руды выполняется по доле извлечения руды, не оказывающей влияния на конечные оседания.

Конечное оседание при равномерной выемке руды (по суммарной площади очистных камер в пределах всего расчетного блока)

$$\eta_p = \frac{(n_B + n_b)S}{n_B B + n_b b + (n_B + n_b)a}. \quad (14)$$

Конечное оседание при неравномерной выемке руды (по суммарной площади очистных камер в пределах расчетного блока, находящегося под междусводовым целиком)

$$\eta_{н.р} = \frac{(n_B - 1)S}{n_B B + (n_B - 1)a}. \quad (15)$$

Коэффициент извлечения руды, не влияющий на конечные оседания земной поверхности,

$$\Delta K_n = \frac{\eta_p - \eta_{н.р}}{h}. \quad (16)$$

Доля извлечения руды из пласта, не оказывающая влияния на конечные оседания земной поверхности,

$$N_\eta = \frac{\Delta K_n}{\eta_p / h} = \frac{(\eta_p - \eta_{н.р})h}{h\eta_p} = 1 - \frac{\eta_{н.р}}{\eta_p}. \quad (17)$$

4. Пример расчета параметров разработки пласта

1. Исходные данные для расчета целиков при отработке пласта Кр. II:

объемный вес пород налегающей толщи γ	2,2 т/м ³
агрегатная прочность пород разрабатываемого пласта $\sigma_{ц}$	2300 т/м ²
глубина разработки H	360 м
высота междукамерного целика (равняется вынимаемой мощности пласта) h	5,6 м
ширина камерного хода a	8 м
площадь камерного хода S	42 м ²
коэффициент нагружения породы междукамерных целиков k_n	0,4
коэффициент нагружения породы междусводовых целиков k_n	0,3
ширина междуходовых целиков b	2,8 м
агрегатная прочность пород кровли σ_k	2150 т/м ²
допустимое оседание земной поверхности $[\eta]$	2,0 м
устойчивый пролет пород кровли a_0	6,0
мощность толщи пород в кровле пласта, в пределах которой разрушение слоев каменной соли не приведет к ухудшению состояния ВЗТ $[h_{св}]$	25 м

2. Согласно (11) ширина междукамерного целика

$$B = 2h = 2 \cdot 5,6 = 11,2 \text{ м исходя из условия } B = 2h;$$

$$B \geq \frac{0,9 \cdot 42 - 8 \cdot 2}{2} = 10,9 \text{ м исходя из условия } [\eta] = 2 \text{ м.}$$

В дальнейших расчетах используется значение ширины междукамерного целика, удовлетворяющее обоим условиям и равное 11,2 м.

3. Согласно (12) количество междукамерных целиков

$$n_B \geq \frac{5 \cdot 5,6 + 8}{11,2 + 8} = 1,8.$$

Принимаем $n_B = 2$.

4. Количество междуходовых целиков

$$2 \cdot 11,2 \cdot 2300 \{1,4 \cdot 0,4 + (0,5 + 2,5 \cdot 0,4)[0,73(11,2/5,6 - 0,5)]\} = \\ = [2 \cdot 11,2 + (2-1) \cdot 8] \cdot 2150 \left\{ 1,4 \cdot 0,3 + (0,5 + 2,5 \cdot 0,3) \times \right. \\ \left. \times \left[0,73 \left(\frac{2 \cdot 11,2 + (2-1) \cdot 8}{0,7[n_b \cdot 2,8 + (n_b + 1) \cdot 8 - 6]} - 0,5 \right) \right] \right\}.$$

В результате решения уравнения определили количество междуходовых целиков $n_b = 2$.

5. Согласно (13) высота развития свода

$$h_{cb} = 0,7[2 \cdot 2,8 + (2+1) \cdot 8 - 6] = 16,6, \text{ м.}$$

При принятых параметрах отработки пласта высота развития свода меньше допустимой $[h_{cb}]$; следовательно, суммарная мощность ненарушенных слоев ВЗТ больше минимально допустимого значения. Таким образом, безопасность подработки ВЗТ обеспечивается.

6. Согласно (14) конечное оседание при равномерной выемке руды

$$\eta_p = \frac{(2+2) \cdot 42}{2 \cdot 11,2 + 2 \cdot 2,8 + (2+2) \cdot 8} = 2,8.$$

7. Согласно (15) при неравномерной выемке руды конечное оседание

$$\eta_{н.р} = \frac{(2-1) \cdot 42}{2 \cdot 11,2 + (2-1) \cdot 8} = 1,38.$$

8. Согласно (16) коэффициент извлечения руды, не оказывающий влияние на конечные оседания земной поверхности,

$$\Delta k_{\eta} = \frac{2,8 - 1,38}{5,6} = 0,25.$$

9. Согласно (17) доля извлечения руды из пласта, не оказывающая влияние на конечные оседания земной поверхности,

$$N_{\eta} = 1 - \frac{1,38}{2,8} = 0,51.$$

5. Список использованной литературы

1. А.с. 1765418 СССР, МПК⁵ E21C 41/30. Способ разработки сближенных калийных пластов /В.Г.Артёмов, Б.А. Крайнев, Е.В. Челпанова. – № 4856050/03; заявл. 06.08.90; опубл. 30.09.92, Бюл. № 17. – 3 с.
2. Пат. 2036306 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих пластов полезных ископаемых комбайновыми комплексами /Л.М. Папулов, В.Г. Артемов, Е.В. Челпанова [и др.]; заявитель и патентообладатель ПО «Уралкалий». – № 5034960/03; заявл. 31.03.92; опубл. 27.05.95, Бюл. № 15. – 3 с.
3. Пат. 2038477 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих калийных пластов ленточными камерами с закладкой /Л.М. Папулов, В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 5026734/03; заявл. 10.02.92; опубл. 27.06.95, Бюл. № 18. – 3 с.
4. Пат. 2042816 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пластов полезного ископаемого /Е.В.Челпанова, В.Г. Артёмов, В.И. Коновалов [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 93005912/03; заявл. 01.02.93; опубл. 27.08.95, Бюл. № 14. – 3 с.
5. Пат. 2055199 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих калийных пластов со слабоустойчивой кровлей / Л.М. Папулов, В.Г. Артемов, В.Е. Челпанова [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 5031429/03; заявл. 17.03.92; опубл. 27.02.96, Бюл. № 6. – 3 с.
6. Пат. 2060389 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих калийных пластов выемочными блоками / Л.М. Папулов, В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 5033860/03; заявл. 10.02.92; опубл. 20.05.96, Бюл. № 14. – 3 с.
7. Пат. 2081316 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ управления горным давлением у границы шахтного поля в краевой части мульды сближения / В.Г. Артёмов, Л.М. Папулов, Е.В. Челпанова, заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 95101258/03; заявл. 27.01.95; опубл. 10.06.97, Бюл. №16. – 3 с.
8. Пат. 2083828 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ разработки пологих калийных пластов камерами / В.Г. Артёмов, Л.М. Па-

пулов, Е.В. Челпанова, заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 95103150/03; заявл. 6.03.95; опубл. 10.07.97, Бюл. № 19. – 3 с.

9. Пат. 2083829 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ разработки сближенных пологих калийных пластов несоосными камерами / Л.М. Папулов [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 95107228/03; заявл. 04.05.95; опубл. 10.07.97, Бюл. № 19. – 6 с.

10. Пат. 2117760 РФ, МПК³ E21C 41/20. Способ разработки сближенных калийных пластов / В.Г. Артёмов, Л.М. Папулов, Е.В. Челпанова; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 96115720/03; заявл. 29.07.96; опубл. 20.08.98, Бюл. № 23. – 3 с.

11. Разработка теоретических основ новых технологий повышения степени извлечения руды, рационального использования и охраны недр крупнейшего в мире Верхнекамского месторождения калийных солей: отчет о НИР / Перм. гос. техн. ун-т; рук. Г.И. Кравченко. – Пермь, 1996. – 38 с. – № ГР 01940001468. – Инв. № 02.960.003403.

12. Методика расчета параметров системы разработки по допустимой степени нагружения последовательности целиков, обладающих разной несущей способностью: отчет о НИР / Перм. гос. техн. ун-т; рук. В.Г. Артёмов. – Пермь, 1996. – 19 с. – № ГР 01950005353. – Инв. № 02.960.007454.

13. Артёмов В.Г. Исследование несущей способности многоопорной конструкции, представляющей периодическую последовательность чередования ленточных целиков с изменяющейся шириной / В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова // Тез. докл. X Междунар. конф. по механике горных пород. – М., 1993. – С. 54–55.

14. Артёмов В.Г. Основы управления горным давлением с целью уменьшения влияния выработанного пространства на оседания подработанной толщи горных пород / В.Г. Артёмов Г.И. Кравченко, Е.В. Челпанова / Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых: тез. докл. – Новосибирск; Екатеринбург, 1994. – С. 69.

15. Артёмов В.Г. Об оценке состояния ленточных солевых целиков по степени их нагружения / В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова // Управление напряженно-деформированным состоянием массива скальных пород при разработке месторождений полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений. – Екатеринбург, 1996. – С. 138–139.

16. Челпанова Е.В. Об управлении геомеханическими процессами в подработанном горном массиве калийных рудников Верхнекамского месторождения последовательно чередующимися одноходовыми и многоходовыми камерами / Е.В. Челпанова // Геомеханика в горном деле – 2000: тез. докл. – Екатеринбург, 2000. – С. 111–112.

17. Челпанова Е.В. Управление оседанием земной поверхности / Е.В. Челпанова // XXX Научно-техн. конф. ГНФ ПГТУ: тез. докл. – Пермь, 2001. – С. 42.

18. Челпанова Е.В. Повышение степени извлечения калийных руд в условиях ограниченного оседания земной поверхности / Е.В. Челпанова // Наука – производству. – 2002. – № 4. – С. 4.

19. Артёмов В.Г. Оценка эффективности управления горным давлением последовательностью чередующихся ленточных целиков, отличающихся значениями несущей способности / В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова, Д.В. Шустов // Вестник ПГТУ. Нефтегазовое и горное дело. – Пермь, 2005. – Вып 6. – С. 121–122.

20. Челпанова Е.В. Способ складирования глинисто-солевых шламов на Верхнекамском месторождении калийных солей / Е.В. Челпанова // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург, 2006. – № 2. – 2 с.

21. Пат. 2054546 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих калийных пластов / Н.Ф. Аникин [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 93017149/03; заявл. 02.04.93; опубл. 20.02.96, Бюл. № 5. – 2 с.

22. Пат. 2059819 РФ, МПК⁶ E21C 41/20. Способ разработки пологих калийных пластов в условиях ограниченных допустимых оседаний земной поверхности / В.Г. Артёмов [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 93041955/03; заявл. 23.10.93; опубл. 10.05.96, Бюл. № 13. – 3 с.

23. Пат. 2098625 РФ, МПК⁶ E21C 41/06. Способ разработки пологих калийных пластов при небольшой мощности водозащит-

ной толщи / В.Г. Артёмов, Л.М. Папулов, Е.В. Челпанова; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 95115421/03; заявл. 31.08.95; опубл. 10.12.97, Бюл. № 34. – 3 с.

24. Пат. 2103505 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ управления горным давлением при камерной системе разработки пологих калийных пластов / В.Г. Артёмов, Л.М. Папулов, Е.В. Челпанова; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 96111743/03; заявл. 11.06.96; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3. – 2 с.

25. Пат. 2103506 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ управления оседанием подработанной толщи пород при камерной системе разработки пологих калийных пластов / В.Г. Артёмов, Л.М. Папулов, Е.В. Челпанова; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 96116660/03; заявл. 13.08.96; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3. – 2 с.

26. Пат. 2074960 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ управления кровлей пологих калийных пластов / Л.М. Папулов, В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова, заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 94028311/03; заявл. 27.07.94; опубл. 10.03.97, Бюл. № 7. – 5 с.

27. Пат. 2074959 РФ, МПК⁶ E21C 41/00. Способ разработки пологих пластов при управлении кровлей на ленточных разноподатливых целиках / Л.М. Папулов, В.Г. Артёмов, Е.В. Челпанова; заявитель и патентообладатель АО «Уралкалий». – № 94026837/03; заявл. 18.07.94; опубл. 10.03.97, Бюл. № 7.

28. Гулевич Г.Е. Камерная система разработки с опорными и поддерживающими целиками / Г.Е. Гулевич // Методы определения размеров опорных целиков и потолочин. – М., 1962. – С. 78–89.

29. Галаев Н.З. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений системами с открытым очистным пространством / Н.З. Галаев, А.А. Иванов. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1986. – 84 с.

30. Челпанова Е.В. Обеспечение возможности уменьшения влияния выработанного пространства на оседание земной поверхности при камерной разработке калийных руд: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Челпанова. – Екатеринбург, 1996. – 24 с.

31. Баклашов И.В. Геомеханика: учеб. для вузов: в 2 т. / И.В. Баклашов. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – Т. 1. – 208 с.

32. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород / Г.Н. Кузнецов. – М.: Углеиздат, 1947. – 179 с.

33. Справочник по разработке соляных месторождений / Р.С. Пермяков [и др.]. – М.: Недра, 1986. – 212 с.

34. Обоснование возможности расширения гражданского строительства, в том числе и домами повышенной этажности в пределах застроенной территории г. Березники, предельно допустимых сроков заполнения выработанных пространств закладкой и рекомендации по специальным мероприятиям, необходимым для обеспечения безопасной эксплуатации подрабатываемых зданий и сооружений: отчет о НИР/ ОАО «Уралкалий»; рук. М.П. Нестеров. – Л.; Пермь, 1981 (фонды ОАО «Уралкалий»).

35. Ставрогин А.Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.

36. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей / Сост. Б.А. Крайнев [и др.]. – СПб, 2004. – 88 с.

Учебное издание

Челпанова Елена Владимировна

**РАСЧЕТ МНОГООПОРНОЙ ПОРОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ИЗ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ ГРУПП ЛЕНТОЧНЫХ ЦЕЛИКОВ,
ОБЛАДАЮЩИХ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ**

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор *Н.Г. Важенина*

Лицензия ЛР № 020370

Подписано в печать 09.01.07. Формат 60×90/16.

Набор компьютерный. Усл. печ. л. 1,75.

Тираж 100 экз. Заказ № 1/2007.

Издательство

Пермского государственного технического университета.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел. (342) 2–198–033.