

ОБОСНОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЦЕЛИКИ
В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

© 2015 г. Ю. Г. Феклистов, А. Д. Голотвин

*Институт горного дела УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
E-mail: feklisov@igduran.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2015 г.

Принята к печати 05.06.2015 г.

В статье приведены результаты исследований распределения давления на ленточные целики и почву прилегающих отработанных участков при подземной отработке пологих и наклонных залежей осадочного типа. В результате анализа шахтных инструментальных измерений и моделирования на эквивалентных материалах определена зависимость тангенса угла давления от отношения вертикального геостатического давления к средней прочности массива. Составлены уравнения для решения программными средствами задачи распределения давления на целики различной ширины, имеющие упругую область и участки с предельным состоянием либо полностью в предельном состоянии. Учтено влияние фактора времени. Полученные результаты позволяют более достоверно оценить состояние целиков в зависимости от их ширины и размеров прилегающих отработанных участков с учетом основных горно-геологических и горнотехнических факторов.

Ключевые слова: *горное давление, целики, область предельного состояния, упругая область.*

ВВЕДЕНИЕ

В практике ведения подземных горных работ в целях обеспечения устойчивости при подготовке и очистной выемке действующих забоев необходимо оставлять целики полезного ископаемого в качестве конструктивных элементов принятых систем разработки. При отработке протяженных пластообразных залежей целики, расположенные по простиранию или падению месторождения, часто имеют форму ленты. Поэтому существует объективная потребность в эффективной методике расчета параметров целиков, которая учитывает не только надежное поддержание кровли, но и оптимальные размеры целиков без лишних потерь полезного ископаемого в недрах. Известны различные подходы для оценки давления на целики (Руппенейт, 1954; Ардашев и др., 1967; Петухов и др., 1976; Фисенко, 1976; Борисов, 1980; Белов, Голотвин, 2005; Белов и др., 2011).

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДАВЛЕНИЯ
НА ЦЕЛИКИ

На рис. 1 приведена схема распределения давления на краевую часть пласта и почву прилегающего выработанного пространства (Ардашев и др., 1967; Петухов и др., 1976; Фисенко, 1976; Феклистов, 1989).

Распределение давления в зоне предельного состояния краевой части пласта принято согласно (Петухов и др., 1976) в виде

$$\sigma_y^d = \sigma_{пл} + 2.6 \sigma_{пл} x / m_b - \gamma H, \quad (1)$$

где σ_y^d – дополнительное давление в зоне предельного состояния краевой части пласта (т.е. более уровня естественного вертикального давления в массиве равного γH), МПа; $\sigma_{пл}$ – прочность пласта на одноосное сжатие в массиве, МПа; $\sigma_{пл} = k_{стр} \sigma_0$, σ_0 – прочность полезного ископаемого пласта при стандартных лабораторных испытаниях на одноосное сжатие, МПа; $k_{стр}$ – коэффициент структурного ослабления (Фисенко, 1976; Карташов и др., 1979); γ – объемный вес пород, МН/м³; H – глубина горных работ, м; x – расстояние от груди в сторону неотработанного массива, м; m_b – вынимаемая мощность пласта, м.

Распределение давления в упругой части зоны опорного давления определялось общей зависимостью (Ардашев и др., 1967; Фисенко, 1976; Зубков, Феклистов, 1988; Зубков и др., 1989)

$$\sigma_y^d = \sigma_{y \max}^d \cdot e^{-(x-d)/b}, \quad (2)$$

где $\sigma_{y \max}^d$ – максимальное дополнительное нормальное напряжение в точке максимума опорного давления, МПа; d – расстояние от груди забоя до точки максимума опорного давления, м; b – коэффициент, характеризующий затухание в упругой области зоны опорного давления по мере удаления в сторону массива, м.

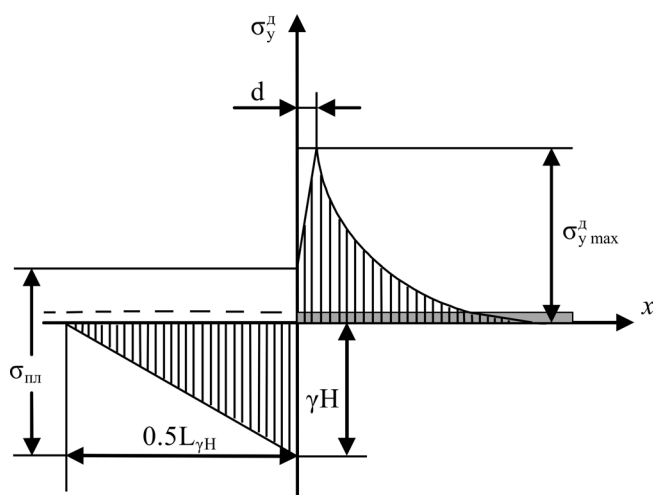


Рис. 1. Схема распределения давления в опорной зоне и выработанном пространстве.

$\sigma_{y \max}^d$ – максимальное дополнительное давление в зоне опорного давления; d – расстояние от груди забоя до максимума опорного давления; $0.5L_{\gamma H}$ – расстояние от груди забоя до точки, где давление в выработанном пространстве становится близким к первоначальному.

Fig. 1. The scheme of pressure distribution both in the support zone and mined-out space.

$\sigma_{y \max}^d$ – maximum additional pressure in the supporting pressure zone; d – the distance from the face bottom up to the supporting pressure maximum; $0.5L_{\gamma H}$ – the distance from the face bottom up to the point where the pressure in mined-out space becomes close to the original.

Значения коэффициента b принимались согласно зависимости, полученной нами в результате экспериментов в шахтных условиях и при моделировании на эквивалентных материалах (Белов, Голотвин, 2005; Белов и др., 2011; Голотвин и др., 2000):

$$b = 0.35(H^2 \cdot m_b)^{1/3} \text{ м.} \quad (3)$$

$$0.5L_{\gamma H} = H / \text{tg} \varphi_d. \quad (4)$$

Расстояние $0.5L_{\gamma H}$ определялось по углам давления φ_d , характеризующих давление на почву пласта в выработанном пространстве (Петухов и др., 1976):

Углы давления приняты согласно полученной нами зависимости в шахтных условиях и на моделях из эквивалентных материалов (Белов, Голотвин, 2005; Белов и др., 2011):

$$\text{tg} \varphi_d = 4.4 (\gamma H / \sigma_{сжм})^{0.5}, \quad (5)$$

где $\sigma_{сжм}$ – средняя (от поверхности до глубины ведения горных работ) прочность пород в массиве, МПа.

Исходя из равенства эпюр по площади в зоне разгрузки и в зоне опорного давления (условие баланса сил), определялось местоположение и величина максимума опорного давления.

На рис. 2 представлена общая схема распределения давления на целик, имеющий упругую область

и области предельного состояния. Согласно данной схеме составлена система уравнений, позволяющая определить основные параметры давления на целик. При этом характер распределения давления в зонах предельного состояния и упругой области принимался такой же, как в краевой части пласта.

Ниже приведена система уравнений, позволяющая решить эту задачу:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{y \max 1}^d &= \sigma_{y \max 1}^d + \sigma_{y \max 2}^d \cdot e^{\frac{-B_0}{b_1}}; \\ \sigma_{y \max 2}^d &= \sigma_{y \max 2}^d + \sigma_{y \max 1}^d \cdot e^{\frac{-B_0}{b_2}}; \\ \sigma_{y \max 1}^d &= \sigma_{пл1} - \gamma \cdot H_1 + \frac{2.6 \cdot \sigma_{пл1} \cdot d_1}{m_b}; \\ \sigma_{y \max 2}^d &= \sigma_{пл2} - \gamma \cdot H_2 + \frac{2.6 \cdot \sigma_{пл2} \cdot d_2}{m_b}; \\ \frac{Q_1 + (\gamma \cdot H_1 - \sigma_{пл1})^2 m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл1}} &= b_1 \cdot \sigma_{y \max 1}^d \left(1 - e^{\frac{-B_0}{b_1}} \right) + \\ &+ \frac{\left(\sigma_{y \max 1}^d + 2 \cdot \sigma_{y \max 1}^d \cdot \sigma_{y \max 2}^d \cdot e^{\frac{-B_0}{b_1}} \right) m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл1}} + \\ &+ \frac{\sigma_{y \max 1}^d \cdot e^{\frac{-2B_0}{b_1}} \cdot m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл2}}; \\ \frac{Q_2 + (\gamma \cdot H_2 - \sigma_{пл2})^2 m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл2}} &= b_2 \cdot \sigma_{y \max 2}^d \left(1 - e^{\frac{-B_0}{b_2}} \right) + \\ &+ \frac{\left(\sigma_{y \max 2}^d + 2 \cdot \sigma_{y \max 2}^d \cdot \sigma_{y \max 1}^d \cdot e^{\frac{-B_0}{b_2}} \right) m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл2}} + \\ &+ \frac{\sigma_{y \max 2}^d \cdot e^{\frac{-2B_0}{b_2}} \cdot m_b}{1.3 \cdot \sigma_{пл1}}; \\ d_1 + d_2 + B_0 &= B_{ц}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $\sigma_{y \max 1}^d$ – суммарное максимальное дополнительное давление с левой стороны целика, Па; $\sigma_{y \max 2}^d$ – суммарное максимальное дополнительное давление с правой стороны целика, МПа; $\sigma_{y \max 1}^d$ – часть максимального дополнительного давления обусловленного пригрузкой с левой стороны (Q_1), МПа; $\sigma_{y \max 2}^d$ – часть максимального дополнительного давления, обусловленного пригрузкой с правой стороны (Q_2), МПа; b_1 – параметр затухания давления в упругой части с левой стороны целика, м; b_2 – параметр затухания давления в упругой части с правой стороны, м; d_1 – размер зоны предельного состояния с левой стороны, м; d_2 – размер зоны предельного состояния с правой стороны, м; $\sigma_{пл1}$ – прочность пласта угля на сжатие с левой стороны, МПа; $\sigma_{пл2}$ – прочность пласта угля на сжатие с правой стороны, МПа; γH_1 – уровень разгрузки со стороны восстания, МПа; γH_2 – уровень разгрузки

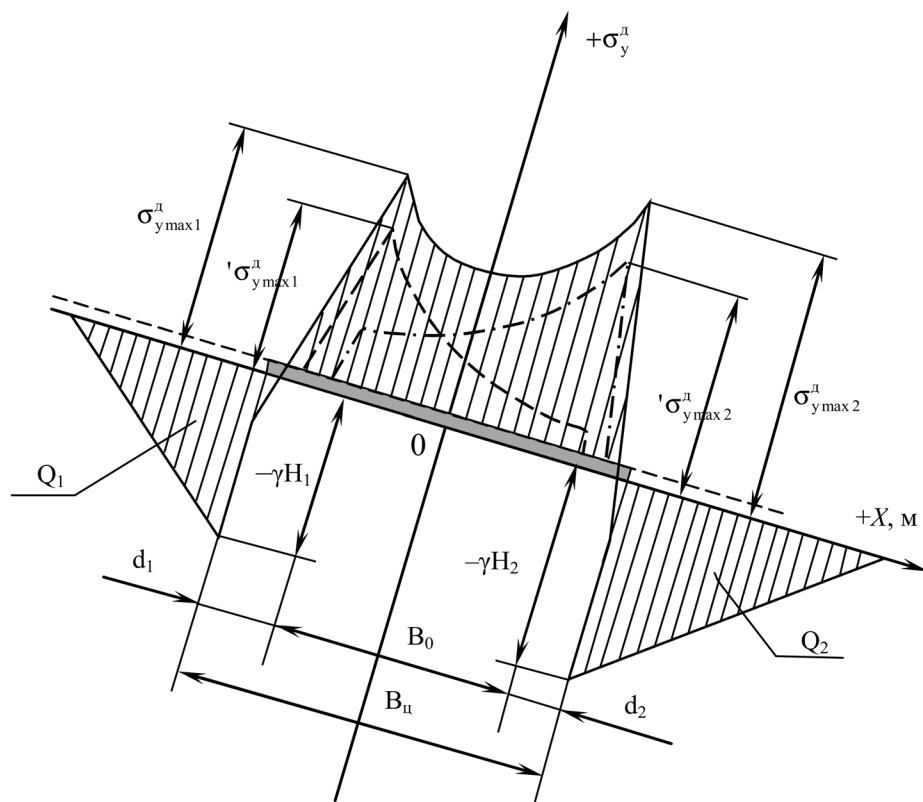


Рис. 2. Схема к расчету параметров давления на целик с упругой областью.

$B_{ц}$ – ширина целика; B_0 – упругая зона; d_1, d_2 – зона предельного состояния; $\sigma_{y \max 1}^л, \sigma_{y \max 2}^л$ – максимальное дополнительное давление на целик со стороны восстания и падения; $'\sigma_{y \max 1}^л, '\sigma_{y \max 2}^л$ – части максимального дополнительного давления, создаваемого пригрузкой от подработанных пород соответственно со стороны восстания и падения; $\gamma H_1, \gamma H_2$ – геостатическое давление пород соответственно со стороны восстания и падения; $Q_1 = 0.5\gamma H_1^2/\text{tg}\varphi_d, Q_2 = 0.5\gamma H_2^2/\text{tg}\varphi_d$ – величина силы разгрузки соответственно со стороны восстания и падения.

Fig. 2. The scheme to calculation pressure parameters on the pillar with elastic zone.

$B_{ц}$ – a pillar's width; B_0 – an elastic zone; d_1, d_2 – the zone of limiting state; $\sigma_{y \max 1}^л, \sigma_{y \max 2}^л$ – maximum additional pressure on a pillar from the part of both uprising and fall; $'\sigma_{y \max 1}^л, '\sigma_{y \max 2}^л$ – parts of maximum additional pressure generated by be-loading from underworked rocks respectively by uprising and fall; $Q_1 = 0.5\gamma H_1^2/\text{tg}\varphi_d, Q_2 = 0.5\gamma H_2^2/\text{tg}\varphi_d$ – geostatic rocks pressure respectively by uprising and fall.

со стороны падения, МПа; $B_{ц}$ – ширина целика, м; B_0 – ширина упругой области целика.

Данная система уравнений решается путем последовательных приближений.

Для случая, когда целик весь находится в предельном состоянии, но его несущая способность достаточна для поддержания подработанных пород и столба пород над собой, развивается максимальное давление. Параметры распределения давления на целик его ширина ($B_{ц \max}$) определяются из условий

$$\begin{cases} Q_1 = (\sigma_{пл1} - \gamma \cdot H_1) d_1 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл1} \cdot d_1^2}{m_b}; \\ Q_2 = (\sigma_{пл2} - \gamma \cdot H_2) d_2 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл2} \cdot d_2^2}{m_b}; \\ d_1 + d_2 = B_{ц \max}. \end{cases} \quad (7)$$

В случае если целик весь находится в предельном состоянии, но его несущая способность недостаточна для поддержания подработанных пород и столба пород над собой, параметры распределения давления на целик и величины пригрузок (Q_1, Q_2) уменьшаются и определяются из условий

$$\begin{cases} 'Q_1 + 'Q_2 = (\sigma_{пл1} - \gamma \cdot H_1) d_1 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл1} \cdot d_1^2}{m_b} + \\ + (\sigma_{пл2} - \gamma \cdot H_2) d_2 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл2} \cdot d_2^2}{m_b}; \\ 'Q_1 = \frac{Q_1}{Q_2}; \\ d_1 + d_2 = B_{ц}, \end{cases} \quad (8)$$

где $'Q_1$ и $'Q_2$ – уменьшенные величины пригрузок со стороны выработанных пространств, МН/м.

В случае если целик не способен поддерживать вес столба пород над собой и пригрузку от подработанных пород, он поддерживает только вес столба над собой. При этом его несущая способность возрастает благодаря возникающему боковому подпору от обрушенных пород. Параметры давления на такой целик определяются из условий:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sigma'_{пл1} - \gamma \cdot H_1 + 2.6 \cdot \sigma_{пл1} \cdot \frac{d_1}{m_b} = \\ & = \sigma'_{пл2} - \gamma \cdot H_2 + 2.6 \cdot \sigma_{пл2} \cdot \frac{d_2}{m_b}; \\ & d_1 + d_2 = B_{ц}; \\ & (\sigma'_{пл1} - \gamma \cdot H_1) d_1 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл1} \cdot d_1^2}{m_b} - \\ & - (\sigma'_{пл2} - \gamma \cdot H_2) d_2 + \frac{1.3 \cdot \sigma_{пл2} \cdot d_2^2}{m_b} = \\ & = B_{ц} \cdot \gamma \cdot H, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где $\sigma'_{пл1}$, $\sigma'_{пл2}$ — увеличенные прочности пласта с разных сторон из-за бокового подпора от обрушенных пород, МПа.

На рис. 3–5 приведены результаты расчетов целиков при различных условиях.

В случаях, если размеры прилегающих к целику отработанных участков меньше $L_{\gamma H}$, то для определения нагрузки на целик, согласно работе (Петухов и др., 1976), следует рассмотреть схему, приведенную на рис. 6.

Для оценки влияния фактора времени на параметры давления на почву выработанного пространства и опорного давления проанализированы следующие сведения: 1) о зонах остаточного опорного давления; 2) об изменении зоны временного опорного давления и давлении подработанных пород в выработанном пространстве при отработке вторых слоев мощных пластов; 3) о продолжительности процесса сдвижения подработанной толщи (Голотвин и др., 2000; Корнилов, 1978; Громов и др., 1985; Указания..., 1984; Правила..., 1998).

При отработке вторых слоев $\text{tg}\varphi_d$ в 1.5–2.0 раза больше, чем при выемке первого слоя в ранее подработанном массиве.

Величина параметра, характеризующего снижение давления в опорной зоне от расстояния по прошествии большого периода времени, определенная расчетами, составляет 0.75b для зоны временного опорного давления.

Полученные значения параметров $\text{tg}\varphi_d$ и b являются предельными. Исходя из анализа наблюдений за сдвижением горных пород, деформациями подготовительных выработок, сохраняемых позади очистного забоя, изменения этих параметров от времени T (мес.), определяли в виде экспоненциальных функций

$$\text{tg}\varphi_{dt} = \text{tg}\varphi / (0.6 + 0.4 e^{-2t/T}), \quad (10)$$

$$b_t = b(0.75 + 0.25 e^{-2t/T}), \quad (11)$$

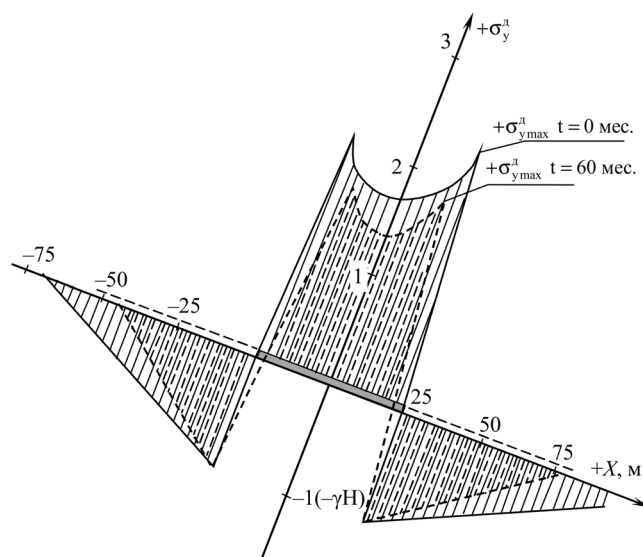


Рис. 3. Расчетные эпюры давления на целик шириной 50 м с упругой областью и на почву выработанных пространств (глубина 400 м, вынимаемая мощность пласта 2 м, размеры отработанных участков более 200 м).

Fig. 3. Calculated pressure profiles on a pillar with 50 meters width and elastic zone and on mined-out space soil (the depth is 400 m, removable stratum thickness is 2 m, mined-out areas dimensions are more than 200 m).

где T — общая продолжительность процесса сдвижения с учетом глубины, мес.

Аналогичным образом учитывалось изменение прочности на кромке пласта во времени:

$$\sigma_{плt} = \sigma_{пл}(0.4 + 0.6 e^{-t/t_0}), \quad t_0 \approx 3 \text{ мес.} \quad (12)$$

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены основные схемы распределения давления на ленточные целики:

- целик с областями предельного состояния и внутренней седлообразной упругой областью;
- целик полностью в предельном состоянии, но его несущая способность достаточна для поддержания подработанных пород и столба пород над собой с максимально возможным давлением вблизи центра;
- целик весь находится в предельном состоянии, но его несущая способность недостаточна для поддержания подработанных пород полностью;
- несущая способность целика достаточна только для поддержания столба пород над собой.

Для данных схем получены общие аналитические решения, которые позволяют в соответствии с экспериментальными данными установить параметры распределения давления на целики в зависимости

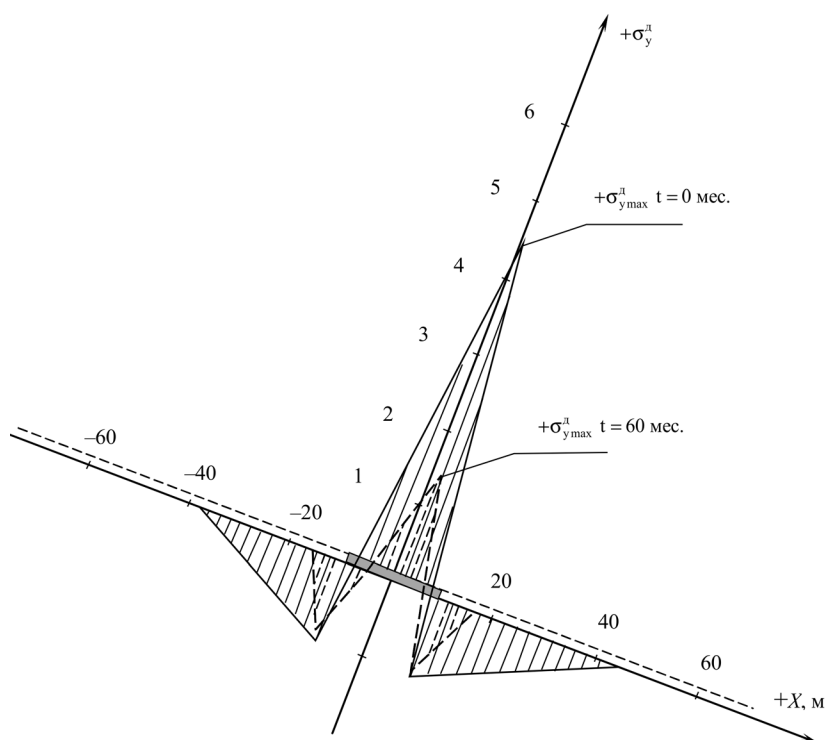


Рис. 4. Расчетные эпюры давления на целик шириной 22 м и на почву выработанных пространств на глубине 400 м, при вынимаемой мощности пласта 2 м и размерах отработанных участков более 200 м.

Fig. 4. Calculated pressure profiles on a pillar with 22 m width and on mined-out space soil: the depth is 400 m, removable stratum thickness is 2 m, mined-out areas dimensions are more than 200 m.

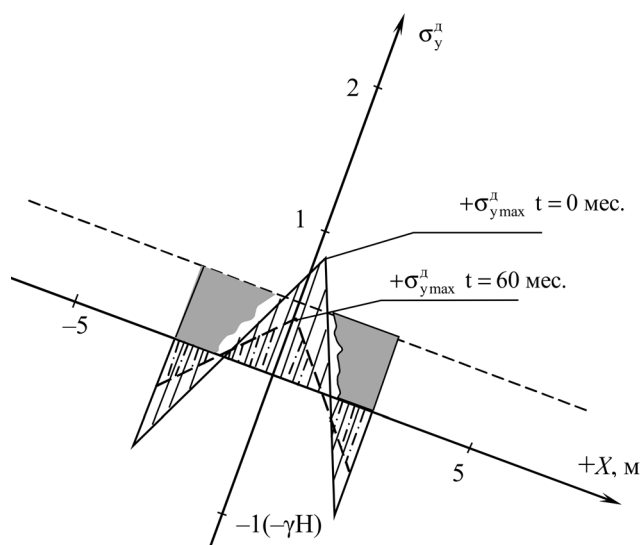


Рис. 5. Расчетные эпюры давления на целик шириной 5 м и на почву выработанных пространств на глубине 400 м, при вынимаемой мощности пласта 2 м и размерах отработанных участков более 200 м.

Fig. 5. Calculated pressure profiles on a pillar with 5 m width and on mined-out space soil: the depth is 400 m, removable stratum thickness is 2 m, mined-out areas dimensions are more than 200 m.

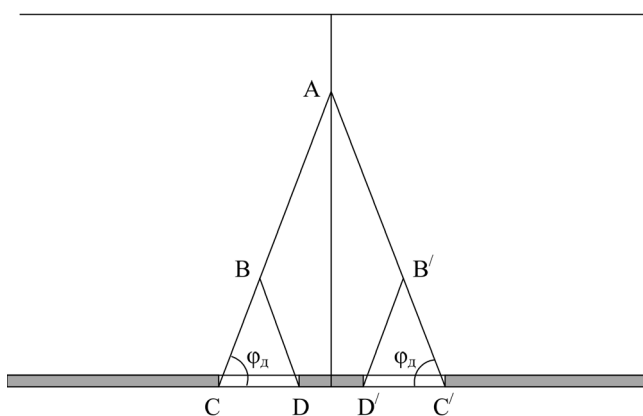


Рис. 6. Схема для определения нагрузки на целик (Q_u) при размерах прилегающих к целику отработанных участков меньше $L_{\gamma H}$: $Q_u = \gamma S_{ABB'/DD'}$.

Fig. 6. The scheme for determination the pillar load (Q_u) with adjacent to it mined-out areas dimensions being less $L_{\gamma H}$: $Q_u = \gamma S_{ABB'/DD'}$.

от основных горно-геологических и горнотехнических факторов с применением разработанных программных средств.

Результаты, полученные в работе, позволяют более аргументированно определять размеры целиков полезного ископаемого в качестве конструктивных элементов систем разработки, охраны магистральных выработок, для оценки возможного негативного влияния целиков как значительных концентраторов напряжений (или же их отсутствие) при дальнейшем ведении горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ардашев К.А., Крылов В.Ф., Кусков Н.И. и др. (1967) Совершенствование управления горным давлением. М.: Недра, 279 с.
- Белов В.А., Голотвин А.Д. (2005) Оценка параметров опорного давления впереди очистного забоя. *Изв. вузов. Горн. журн.* (1), 18-21.
- Белов В.А., Голотвин А.Д., Потапов В.В. (2011) Влияние целиков и краевых частей угольных пластов на подготовительные выработки. *Изв. вузов. Горн. журн.* (7), 98-101.
- Борисов А.А. (1980) Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 353 с.
- Голотвин А.Д., Феклистов Ю.Г., Летов С.А., Гончаренко В.Н., Вандышев М.А., Шлимович Ю.Б. и др. (2000) Рекомендации по управлению горным давлением в очистных забоях на шахтах ОАО "Челябинскуголь". Екатеринбург: УФ ВНИМИ, УГГА, "Челябинскуголь", 90 с.
- Громов Ю.В., Бычков Ю.Н., Кругликов В.П. (1985) Управление горным давлением при разработке мощных пологих пластов угля. М.: Недра, 239 с.
- Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. (1988) Совершенствование метода расчета параметров целиков Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 15 с. Деп. в Черметинформ. 24.06.88, № 4559 чм.
- Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Пятков Ю.Ф. и др. Исследования закономерностей нагружения ленточных целиков и их сопряжений. (1989) (Ред. А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов и др.). Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 10 с. Деп. в Черметинформ. 20.02.89, № 4961 чм.
- Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В. Фадеев А.Б. (1979) Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 269 с.
- Корнилов В. Н. (1978) Расчет параметров зоны остаточного опорного давления на первых и нижних слоях мощных пластов с учетом фактора времени. *Изв. вузов. Горн. журн.* (6), 10-16.
- Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. (1976) Теория защитных пластов. М.: Недра, 224 с.
- Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок на угольных месторождениях. (1998) СПб.: ВНИМИ, 291 с.
- Руппнейт К.В. (1954) Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 384 с.
- Феклистов Ю.Г. (1989) Определение деформаций вмещающих пород в процессе выемки рудных тел на границе с зоной обрушения. *Физ.-техн. пробл. разработки полез. ископаемых.* (4), 116-119.
- Фисенко Г.Л. (1976) Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 272 с.
- Указания по управлению горным давлением в очистных забоях под (над) целиками и краевыми частями угольных пластов мощностью до 3,5 м и углом падения до 35°. (1984) Л.: ВНИМИ, Печорниипроект, КНИУИ, 62 с.

Рецензент А.А. Барях

Grounding pressure distribution on pillars in sedimentary rocks

Yu. G. Feklistov, A. D. Golotvin

The Institute of mining UB RAS

The results of investigations on pressure distribution both on belt pillars and soil of adjacent mined-out areas are cited when sedimentary type flat and sloping deposits are mined by subsurface operations. As a result of the analysis of mine instrumental measurements and equivalent materials modeling the tangent pressure angle dependence from the ratio of vertical geostatic pressure to average rock mass strength is determined. The equations are set up for solving the task of pressure distribution on pillars of different width having elastic area and sites with limiting conditions or being completely in limiting state. The influence of time factor is taken into account. The obtained results permit to perform a more reliable estimation of the pillars state depending on their width and adjacent mined-out areas dimensions with due regard for key mining-geological and mining-technical factors.

Key words: *confining, pressure, pillars, the region limit state, the elastic area.*