

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ПРОЧНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ СТЕНОК-ДИАФРАГМ

Д.К. Погосян

Национальный политехнический университет Армении

Определение параметров конструктивных элементов новым комбинированным способом освоения рудных месторождений с размещением отвальных хвостов сводится к решению геомеханических задач по обоснованию необходимой прочности искусственных стенок-диафрагм, где основную сложность представляют оценка механических характеристик породно-рудного массива, в котором создаются подземные сооружения, а также характер проявления горного давления.

Для определения боковой нагрузки, приходящейся на стенки-диафрагмы при комбинированном способе разработки рудных месторождений, принят аналитический метод расчета проф. А.А. Иливицкого, при котором боковая нагрузка на стенку-диафрагму обусловлена сдвижением пород висячего бока. Момент предельного равновесия — это когда стенка-диафрагма начинает сдвигаться, но ее перемещение еще бесконечно мало. Согласно принятой методике, для устойчивости стенок-диафрагм необходимо, чтобы искусственные стенки-диафрагмы, как основные несущие элементы, противодействовали боковой нагрузке со стороны висячего бока. Причем допускается, что напряжения по площади поперечного сечения стенок-диафрагм распределяются равномерно. При этом неравномерность распределения напряжений учитывается введением в расчет коэффициента запаса прочности.

В результате геомеханических исследований выявлены зависимости временного сопротивления бетонного материала стенок-диафрагм при одноосном сжатии от глубины подземной разработки и ширины камеры.

Обосновано, что, при прочих равных условиях, чем больше глубина разработки, ширина камер и меньше ширина стенок-диафрагм, тем выше прочность бетона на сжатие стенок-диафрагм.

Отличительной особенностью данной задачи является множественность решений, отвечающих техническим и технологическим требованиям. Однако требуется найти оптимальные параметры конструктивных элементов рассматриваемого способа путем экономико-математического моделирования.

Ключевые слова: руда, стенка-диафрагма, бетон, одноосное сжатие, камера, боковое давление, разработка, висячий бок.

Введение. В работах [1, 2] приведено технологическое обоснование нового комбинированного открыто-подземного способа разработки рудных месторождений с размещением отвальных хвостов при отработке мощных и весьма мощных рудных тел, характеризующихся неустойчивыми породно-рудными массивами.

Основной характерной особенностью нового способа является то, что мощное и весьма мощное крутопадающее вытянутое рудное тело в верхней части разрабатывается открытым способом. Затем ниже дна карьера в массиве рудного тела предварительно создаются поперечные вертикальные стенки-диафрагмы и наклонные стенки со стороны боков рудного тела, после чего ограниченные с боков бетонными и железобетонными стенками временные рудные целики отрабатываются системой этажной отбойки с торцовым выпуском руды, где отбойка руды осуществляется с помощью параллельно расположенных взрывных скважин, пробуренных со дна карьера. В результате создается подземное сооружение – камеры, которые могут использоваться для размещения отвальных хвостов (рис. 1).

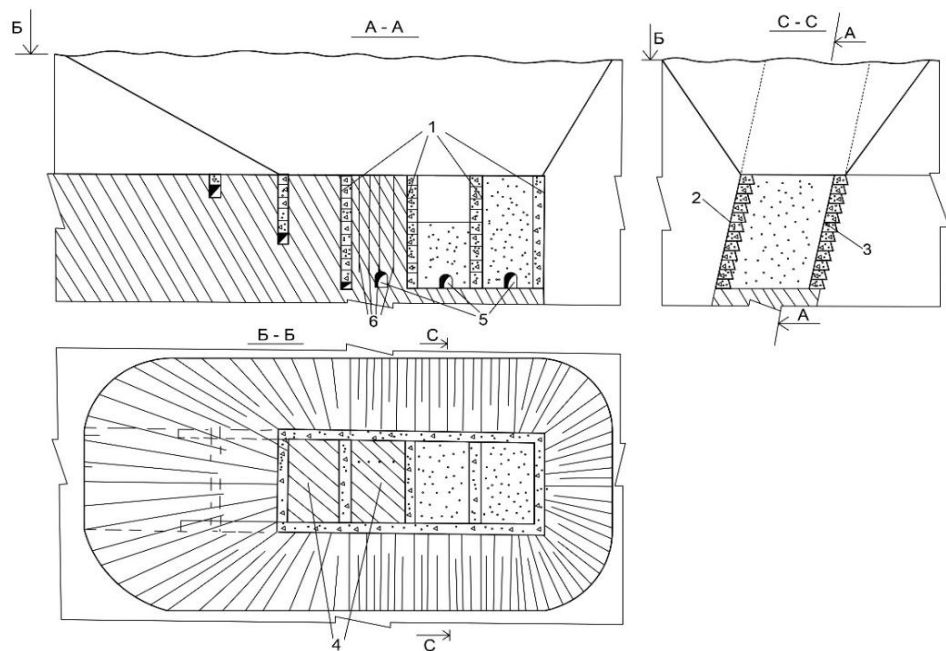


Рис. 1. Новый комбинированный открыто-подземный способ освоения рудных месторождений с размещением отвальных хвостов: 1 – стенка-диафрагма, 2 – висячий бок, 3 – лежащий бок, 4 – будущие подземные пустоты, 5 – доставочные орты, 6 – взрывные скважины

Данное технологическое решение, объединяя главные преимущества открытого и подземного способов разработки, позволяет: снизить общий объем вскрышных пород; уменьшить ореол нарушения земельных угодий; сократить ущерб, наносимый горным производством окружающей среде; повысить интенсивность разработки месторождения; создать подземные пустоты для размещения отвальных хвостов; обеспечить наиболее высокие технико-экономические показатели промышленного освоения месторождения.

Постановка задачи и методы исследования. Определение параметров конструктивных элементов новым комбинированным способом освоения рудных месторождений с размещением отвальных хвостов сводится, в первую очередь, к решению геомеханических задач по обоснованию необходимой прочности искусственных стенок-диафрагм.

При решении данной задачи основную сложность представляют оценка механических характеристик породно-рудного массива, в котором создаются подземные сооружения, а также характер проявления горного давления.

Происхождение породных массивов и приуроченных к ним рудных месторождений теснейшим образом связано с геологическими процессами. Вследствие этого реальный массив горных пород и/или руд в связи с наличием в них трещин различного происхождения (тектонических, трещин отдельности, кливажных, выветривания и др.), слоистости и различий в отдельных частях минералогического состава неоднороден по своим физико-механическим свойствам и в целом представляет собой сложную физическую среду. Раздробленность массива горных пород и руд системами трещин придает ему блоковое строение со слабыми связями между достаточно жесткими и прочными блоками и приводит к возникновению эффекта структурного ослабления, который проявляется в снижении прочности трещиноватого массива по сравнению с прочностью образца:

$$\sigma_{масс} = K_c \sigma_{обр}, \quad (1)$$

где $\sigma_{масс}$ – временное сопротивление массива на сжатие, МПа; $\sigma_{обр}$ – временное сопротивление образца на сжатие, МПа; K_c – коэффициент структурного ослабления.

Это обстоятельство вынуждает при аналитическом исследовании механических процессов идеализировать реальный породный и/или рудный массив и придать ему такое математическое отображение, которое отражает только главные существенные свойства, а все остальные факторы, которые с точки зрения исследуемых явлений несущественны, отбрасывать. Этому вопросу

посвящены многочисленные работы [3-5], согласно которым натуральный породный и/или рудный массив может быть представлен в определенных условиях моделью сплошной среды.

В качестве критерия, позволяющего рассматривать геологическую среду как квазисплошную, предлагается соотношение [5]

$$\Delta A < \varepsilon \text{ при } \Delta a < l_o, \quad (2)$$

где ΔA – разность значений напряжений, деформаций и смещений в соседних точках массива с приращением координат Δa ; l_o – линейный размер элементарного объема, т.е. элементарная длина; Δ – допускаемая погрешность в определении ΔA (до 15% от среднего значения).

Согласно соображениям, приведенным в работе [5], имеем

$$l_o = 10h, \quad (3)$$

где h – средний характерный размер структурного блока массива.

С другой стороны, выявлено соотношение (Ф. Ясинский), устанавливающее связь между величиной отклонения от средних значений напряжений на элементарной площадке и относительными размерами этой площадки:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{l_o}{L}}, \quad (4)$$

где L – размер исследуемой области массива;

$$l_o = \varepsilon^2 L. \quad (5)$$

Подставляя выражение (3) в формулу (5), получим

$$L = \frac{10h}{\varepsilon^2}. \quad (6)$$

Если принять, что $\varepsilon \leq 15\%$, то можно написать условие, при котором использование геомеханической модели сплошной среды обосновано:

$$L \geq 444.4h. \quad (7)$$

В этом смысле при рассматриваемом комбинированном способе эксплуатации месторождений геомеханическое исследование проявления горного давления с использованием модели сплошной среды приемлемо, так как соблюдается условие (7): глубина разработки, длина и ширина площади подработки (характерные размеры исследуемой области массива), в основном, в 444,4 раза превышают средний характерный размер структурного блока массива.

Решение задачи о прочных размерах межкамерных рудных целиков при этажно-камерных системах разработки в условиях, находящихся в выше-лежащих отработанных этажах обрушенных пород и потерянных руд, содержится в методике профессора А.А. Иливицкого [6], которая принимается для

обоснования необходимой прочности искусственных стенок-диафрагм при новом комбинированном способе освоения рудных месторождений.

На рис. 2 приводится расчетная схема по определению необходимой прочности искусственных стенок-диафрагм.

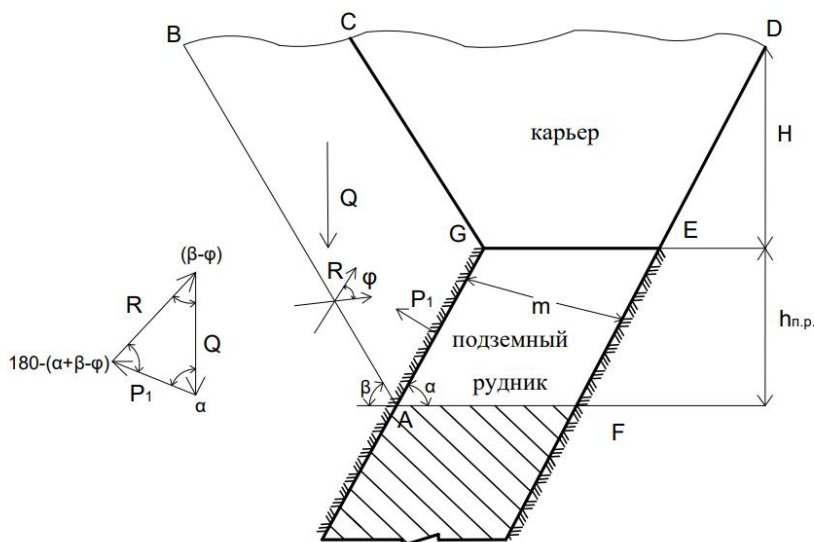


Рис. 2. Расчетная схема по определению необходимой прочности искусственных стенок-диафрагм при открыто-подземном способе разработки рудных месторождений

Согласно принятой методике [6], боковая нагрузка на воображаемый целик (стенка-диафрагма) обусловлена сдвижением пород висячего бока. В момент предельного равновесия, т.е. когда стенка-диафрагма начинает сдвигаться, но его перемещение еще бесконечно мало, на сползающее тело действуют следующие силы:

1) собственный вес сползающего тела со стороны висячего бока - Q , $\kappa H/м$, приходящийся на единицу длины по простираению рудного тела, которая представляется в пределах контуров ABCG;

2) реакция поверхности AB-R, $\kappa H/м$, которая отклонена от нормали к поверхности AB величиной приведенного угла внутреннего трения φ , град., так как на момент предельного равновесия на поверхность AB действуют силы трения и сцепления;

3) реакция стенки-диафрагмы - P_1 , $\kappa H/м$, противодействующая боковой нагрузке со стороны висячего бока, направленная по нормали.

Вывод расчетной формулы сводится к тому, что из диаграмм сил (рис. 2) с помощью уравнения синусов определяется боковая нагрузка, отнесенная к 1 м по простиранию рудного тела:

$$P_1 = \frac{Q \sin(\beta - \varphi)}{\sin(\alpha + \beta - \varphi)}, \quad (8)$$

где α – угол падения рудного тела, град.; β – угол сдвижения пород висячего бока, град., который, согласно проф. П.М. Цимбаревичу, составляет

$$\beta = 45 + \frac{\varphi}{2}, \quad (9)$$

$$Q = 10\gamma_n h_{c.d.} (H + 0.5h_{c.d.})(ctg\alpha + ctg\beta), \quad (10)$$

где γ_n – объёмная масса боковых пород, m/m^3 ; $h_{c.d.}$ – высота стенки-диафрагмы (камеры), м; H – глубина от поверхности до верха стенки-диафрагмы, м.

Величина бокового давления (P , МПа) составит

$$P = \frac{0.001P_1 \sin\alpha}{h_{c.d.}}. \quad (11)$$

Тогда величина боковой нагрузки, приходящейся на стенки-диафрагмы ($P_{c.d.}$, кН), составит

$$P_{c.d.} = \frac{1000P(L_k + L_{c.d.})h_{c.d.}}{\sin\alpha}, \quad (12)$$

где L_k – ширина камеры, м; $L_{c.d.}$ – ширина искусственной стенки-диафрагмы, м.

Искусственные стенки-диафрагмы, как основные несущие элементы, являются своеобразными распорными конструкциями. По условиям взаимодействия с вмещающими породами они работают на сжатие в независимом режиме, т.е. воспринимают нагрузку от боковых пород и через железобетонную стенку со стороны висячего бока передают на лежащий бок. Тогда несущая способность стенки-диафрагмы ($N_{c.d.}$, кН) составит

$$N_{c.d.} = \frac{1000\sigma L_{c.d.} h_{c.d.} K_\phi}{K_3 \sin\alpha}, \quad (13)$$

где σ – временное сопротивление бетонного материала стенки-диафрагмы одноосному сжатию, МПа; K_ϕ – коэффициент формы стенки-диафрагмы; K_3 – коэффициент запаса прочности стенки-диафрагмы, учитывающий неравномерность распределения напряжений по сечению стенки-диафрагмы, принимаемый равным 2...3.

Коэффициент формы стенок-диафрагм является эмпирическим, весьма приближенной величиной, и в данном случае, когда $L_{c.d.} < m - (d_b + d_l)\sin\alpha$, то:

$$K_\phi = \sqrt{\frac{L_{c.d.}}{m - (d_b + d_l)\sin\alpha}}, \quad (14)$$

где m – мощность рудного тела, м; d_b и d_l – толщина железобетонной стенки со стороны висячего и лежащего боков, м.

Для устойчивости стенок-диафрагм необходимо соблюдать следующее условие:

$$N_{c.d} \geq P_{c.d} . \quad (15)$$

Подставляя значения K_ϕ в формулу (13), на основе условия (15) определяется искомая величина – временное сопротивление на одноосное сжатие закладочного материала стенок-диафрагм.

Результаты исследования. На рис. 3 представлен график зависимости временного сопротивления бетонного материала стенок-диафрагм по одноосному сжатию (σ , МПа) от глубины подземной разработки (H , м) при различных величинах ширины искусственной стенки-диафрагмы, равной однократным, двукратным и трехкратным размерам $L_{c.d}$ (3, 6 и 9 м).

В расчетах приняты следующие обозначения: $t=16$ м, $\alpha=60^\circ$, $\beta=60^\circ$, $\varphi=33^\circ$, $h_{c.d}=50$ м, $L_k=10$ м, $\gamma_n=2.5$ м/м³, $d_6=3$ м, $d_l=3$ м и $K_3=2.5$.

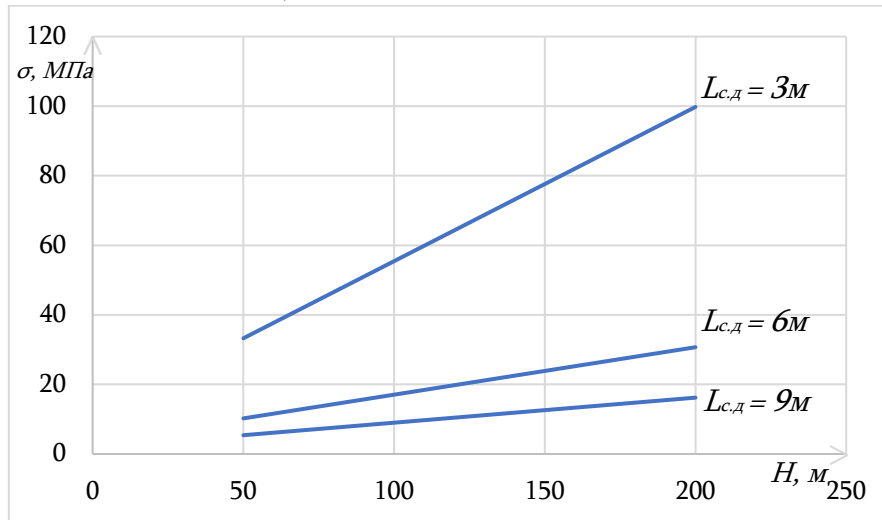


Рис. 3. График зависимости σ от H при $L_{c.d}=3$; 6 и 9 м

Зависимость величин σ от H выражается тем, что, при прочих равных условиях, увеличение глубины подземной разработки приводит к повышению прочности бетона на сжатие стенки-диафрагмы.

На рис. 4 представлен график зависимости временного сопротивления бетонного материала стенок-диафрагм по одноосному сжатию (σ , МПа) от ширины камеры (L_k , м) при различных величинах ширины искусственной стенки-диафрагмы, равной однократным, двукратным и трехкратным размерам $L_{c.d}$ (3, 6 и 9 м), когда $t=16$ м, $H=150$ м, $\alpha=60^\circ$, $\beta=60^\circ$, $\varphi=33^\circ$, $h_{c.d}=50$ м, $L_k=10$ м, $\gamma_n=2.5$ м/м³, $d_6=3$ м, $d_l=3$ м и $K_3=2.5$.

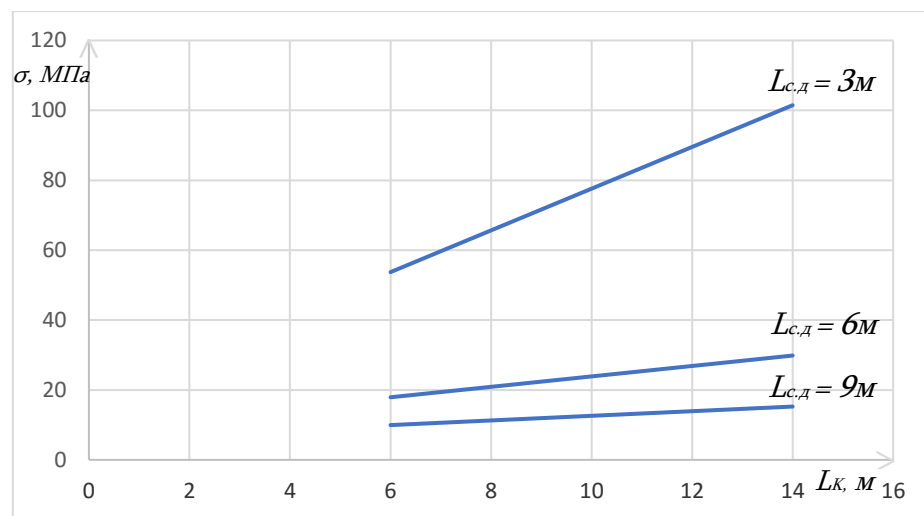


Рис. 4. График зависимости σ от L_k при $L_{с,д} = 3; 6$ и 9 м

Выявление закономерностей изменения величин σ от L_k свидетельствует о том, что, при прочих равных условиях, уменьшение ширины камеры приводит к снижению прочности бетона на сжатие стенок-диафрагм.

Заключение. С целью определения боковой нагрузки, приходящейся на стенки-диафрагмы при комбинированном способе разработки рудных месторождений, принят аналитический метод расчета проф. А.А. Иливицкого.

Для определения необходимой прочности на сжатие искусственных междуканальных стенок-диафрагм, являющихся основными несущими элементами в пределах этажа, даны расчетные зависимости с учетом действия бокового давления.

Обосновано, что при постоянстве других влияющих факторов, чем больше глубина разработки, ширина камер и меньше ширина стенок-диафрагм, тем выше прочность бетона на сжатие стенок-диафрагм.

Отличительной особенностью данной задачи является множественность решений, отвечающих техническим и технологическим требованиям. Однако требуется найти оптимальные параметры конструктивных элементов рассматриваемого способа, что возможно осуществить путем экономико-математического моделирования.

Литература

1. Оганесян А.Г., Погосян Д.К. Новый комбинированный открыто-подземный способ освоения рудных месторождений с размещением отвальных хвостов //

Вестник НПУА: Metallurgia, материаловедение, недропользование.— 2021.— N2.— С. 79 – 88.

2. Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր N 731 Y: Ստորգետնյա դատարկությունների ձևավորման եղանակ / **Ա.Հ. Հովհաննիսյան, Դ.Կ. Պողոսյան.**– Երևան, 2022:
3. **Дашко Р.Э.** Механика горных пород.— М.: Недра, 1987.— 264 с.
4. **Булычев Н.С.** Механика подземных сооружений.— М.: Недра, 1982.— 270 с.
5. **Баклашов И.В., Картозия Б.А.** Механика подземных сооружений и конструкций крепей.— М.: Недра, 1984.— 415 с.
6. **Иливицкий А.А.** Методы расчета междукammerных целиков и потолочин при разработке крутопадающих рудных месторождений // Методы определения размеров опорных целиков и потолочин.— М.: Изд-во АН СССР, 1962.— С. 95–104.

Поступила в редакцию 12.12.2022.

Принята к опубликованию 08.02.2023.

ԱՐՇԵՍԱԿԱՆ ՊԱՏ-ԴԻԱՖՐԱԳՄԱՆԵՐԻ ԱՆՀՐԱԺԵՇՏ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Դ.Կ. Պողոսյան

Լցակույտային պոչանքների տեղավորմամբ հանքաքարային հանքավայրերի յուրացման նոր համակցված եղանակի կառուցվածքային տարրերի պարամետրերի որոշումը հանգում է արհեստական պատ-դիաֆրագմաների անհրաժեշտ ամրության երկրամեխանիկական խնդրի լուծմանը, երբ հիմնական բարդությունը կառուցվող ստորգետնյա շինությունները շրջապատող ապարահանքաքարային զանգվածի մեխանիկական բնութագրերի, ինչպես նաև լեռնային ճնշման դրսևորման բնույթի գնահատումն է:

Հանքաքարային հանքավայրերի մշակման համակցված եղանակի պատ-դիաֆրագմաների վրա ընկնող կողային բեռնվածության որոշման համար ընդունվել է պրոֆ. Ա.Ա. Իլիվիցկու հաշվարկման անալիտիկ մեթոդը, որի դեպքում պատ-դիաֆրագմայի վրա ընկնող կողային բեռնվածությունը պայմանավորված է կախված կողի ապարների տեղաշարժով: Սահմանային հավասարակշռության պահին, այսինքն, երբ պատ-դիաֆրագման սկսում է տեղաշարժվել, նրա շարժը դեռ անսահման փոքր է: Համաձայն ընդունված մեթոդի՝ պատ-դիաֆրագմաների կայունության համար անհրաժեշտ է, որ արհեստական պատ-դիաֆրագմաները՝ որպես հիմնական կրող տարրեր, հակազդեն կախված կողի կողային բեռնվածքին: Ընդ որում, թույլատրվում է, որ պատ-դիաֆրագմաների լայնական հատվածի վրա լարումները բաշխված լինեն հավասարաչափ: Այս դեպքում լարումների անհավասարաչափ բաշխումը հաշվի է առնվում՝ հաշվարկի մեջ ամրության պաշարի գործակցի ներմուծմամբ:

Երկրամեխանիկական հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է մեկ-առանցքանի սեղմման դեպքում պատ-դիաֆրագմաների բետոնային նյութի ժամանակավոր դիմադրության կախվածությունը ստորգետնյա մշակման խորությունից և խցերի լայնությունից:

Հիմնավորվում է, որ այլ հավասար պայմաններում որքան մեծ են մշակման խորությունը, խցերի լայնությունը, և փոքր է պատ-դիաֆրագմաների լայնությունը, այնքան մեծ է պատ-դիաֆրագմայի բետոնի սեղմման ամրությունը:

Այս խնդրի տարբերակիչ առանձնահատկությունը լուծումների բազմազանությունն է, որոնք բոլորն էլ համապատասխանում են տեխնիկական և տեխնոլոգիական պահանջներին: Սակայն պահանջվում է տնտեսագիտամաթեմատիկական մոդելավորմամբ գտնել դիտարկվող եղանակի կառուցվածքային տարրերի օպտիմալ պարամետրերը:

Առանցքային բառեր. հանքաքար, պատ-դիաֆրագմա, բետոն, միաառանցք սեղմում, խուց, կողային ճնշում, մշակում, կախված կող:

DETERMINING THE NECESSARY STRENGTH OF ARTIFICIAL WALL-DIAPHRAGMS

D.K. Poghosyan

Determining the parameters of the structural elements by the new combined method of exploiting ore deposits with the placement of tailings leads to the solution of the geomechanical problem of the necessary strength of artificial wall-diaphragms, where the main difficulty lies in the evaluation of the mechanical characteristics of the rock mass surrounding the underground buildings under construction, as well as the nature of the manifestation of mountain pressure.

To determine the lateral load attributable to the diaphragm walls of the combined method of mining ore deposits, the analytical calculation method of Prof. A.A. Ilivitsky is taken in which the lateral load on the wall-diaphragm is due to the displacement of the rocks of the hanging side. According to the mentioned method, for the stability of the wall-diaphragms, it is necessary that the artificial wall-diaphragms, as the main load-bearing elements, resist the lateral load from the hanging side. At the same time, the stresses on the transverse section of the wall-diaphragms are allowed to be distributed evenly. In this case, the uneven distribution of stresses is taken into account by introducing a safety factor into the calculation.

As a result of geomechanical research, the dependence of the temporary resistance of the concrete material of the wall-diaphragms on the depth of underground processing and the width of the cells in the case of single axial compression are revealed.

It is substantiated that, other conditions being equal, the greater the depth of treatment, the width of the cells, and the smaller the width of the wall-diaphragms, the greater is the compressive strength of the wall-diaphragm concrete.

A distinctive feature of this problem is the variety of solutions, all of which meet the technical and technological requirements. However, it is required to find the optimal parameters of the structural elements of the method under consideration using economic and mathematical modeling.

Keyword: ore, wall-diaphragm, concrete, uniaxial compression, cell, lateral pressure, development, hanging side.