

УДК 622.016:624.131.53

А. Н. Богомолов^а, О. А. Богомолова^б, А. Б. Пономарев^в

^а *ОАО «НПЭК ОиФ»*

^б *Волгоградский государственный технический университет*

^в *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ О ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Представлены предложения по решению некоторых задач о горизонтальных подземных выработках. Рассматривается задача о рациональных формах поперечного сечения подземной выработки и отыскании напряженного состояния в ее окрестности и на ее поверхности. Предлагается подход к определению максимальной глубины заложения горизонтальной подземной выработки, основанный на критерии устойчивости, предполагающем, что в точках поверхности горной выработки величины нормальных тангенциальных напряжений не должны превышать пределов прочности вмещающей породы при растяжении и сжатии. Показано, что для определения осадок дневной поверхности, расположенной над выработкой, необходимо использовать численные методы, т. к. только с их помощью можно учесть максимальное количество факторов, определяющих величины осадок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: горизонтальная подземная выработка, штрек, поперечное сечение выработки, рациональное сечение, максимальная глубина заложения, критерий устойчивости, численные методы, осадки дневной поверхности.

Введение

Возрастающие с каждым годом объемы подземного строительства и добычи полезных ископаемых обуславливают повышенные требования к минимизации затрат по проходке и последующей эксплуатации подземных выработок. Одной из наиболее затратных работ является крепление свода выработки для предотвращения его обрушения. Чтобы минимизировать расходы, связанные с проведением таких работ, в разное время предлагались различные формы потолочины выработок, обеспечивающие образование свода «естественного равновесия» [1].

В работе [2], например, описаны результаты экспериментальных и натурных исследований устойчивости подземных выработок в зависимости от размеров и формы их поперечного сечения. Показано, что выработки с поперечным сечением потолочины, подобным по форме треугольнику, боковые стороны которого отклонены от вертикали на угол $\alpha \leq 15...30^\circ$, имеют собственную высокую устойчивость, а в случае необходимости проведения работ по их укреплению, требуют малых затрат.

Теоретически это обстоятельство объясняется тем, что в окрестности потолочины выработки треугольного сечения происходит существенное увеличение прочности грунтов и горных пород поскольку в зоне, прилегающей к вершине треугольника образующей потолочину, вертикальные σ_z и горизонтальные σ_x составляющие напряжений достигают значительных величин, причем, $\sigma_z \approx \sigma_x$ (эффект всестороннего сжатия).

Что касается натурных наблюдений, то М. М. Протодьяконов пишет, что выработки с формой потолочины, подобной треугольнику, «...имеют форму очень высокого свода...» и «...могут стоять долгие годы без ремонта» [3].

В работе С. К. Килессо приводятся данные о том, что подобные штреки стоят без какого-либо ремонта с IV в. до н.э. [4].

Вывод о том, что форма потолочины подобного сечения является наиболее оптимальной для выработок, расположенных на больших глубинах, сделан на основании натуральных и расчетных данных в работе [5].

На рисунках 1—3 изображены своды естественного равновесия, приведенные в работах независимых авторов, описанные ими по результатам натуральных и экспериментальных данных. Видно, что все своды имеют форму сечения, которая максимально приближена к форме треугольника.

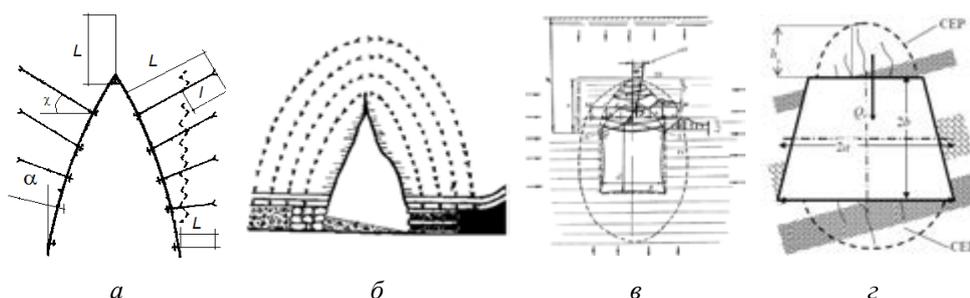


Рис. 1. Своды естественного равновесия: *а* — форма свода, полученного экспериментально; *б* — свод естественного равновесия в заброшенной штольне; *в, з* — своды естественного равновесия в природных грунтовых массивах [3, 6, 7]

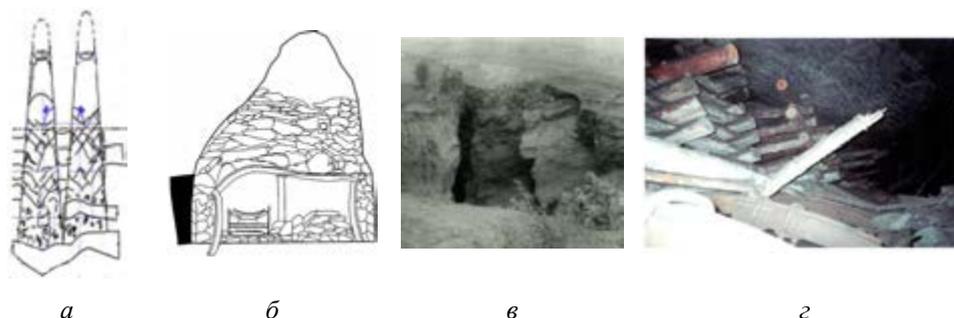


Рис. 2. Воронка-провал на восточном борту карьера ЦГОКа (*а*) и разрез по простиранию залежи (*б*); сечение (*в*) и фрагмент вывала кровли (*з*) восточного разведочно-дренажного штрека до перекрепления шахты «Комсомольская» [8, 9]

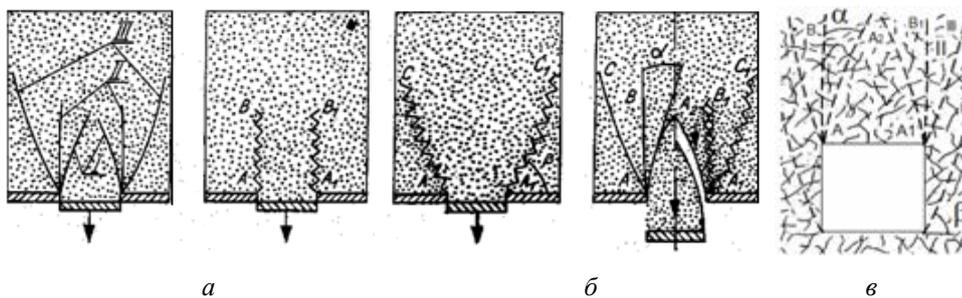


Рис. 3. Очертания сводов естественного равновесия, полученных опытным путем на моделях из сыпучих материалов, с учетом явления дилатансии [2]

Анализ приведенных данных показывает, что в большинстве случаев в естественных и лабораторных условиях устойчивый свод имеет форму вытянутого вверх треугольника.

Вторая задача, возникающая параллельно задаче о рациональной форме горизонтальной выработки, это определение максимальной глубины заложения выработки определенного поперечного сечения и размера.

Третья задача — определение величины осадки земной поверхности в зависимости от формы сечения подземной выработки.

В настоящей статье рассматриваются понятие «рациональное сечение» горизонтальной подземной выработки с точки зрения ее устойчивости и величины осадки дневной поверхности и способы определения предельной глубины ее заложения.

I. Рациональная форма поперечного сечения горизонтальной подземной выработки

В работе [10] предложена функция комплексного переменного

$$z = \omega(\zeta) = i(A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^2 + D\zeta^3), \quad (1)$$

где

$$z = x + iy,$$

$$\zeta = \cos \theta + i \sin \theta,$$

A, B, C, D — действительные числа,

осуществляющая конформное отображение внутренности единичного круга на внешность бесконечной односвязной области, границей которой является простая замкнутая кривая.

В зависимости от численных значений коэффициентов функции (1), эта кривая может ограничивать внешность рассматриваемой области, принимающей форму криволинейных трапеции, треугольника, ромба или других геометрических фигур.

Рассуждая аналогично автору [10], отделим действительную часть от мнимой части в выражении (1), получив при этом параметрические уравнения упомянутой выше кривой в виде

$$\begin{aligned} x(\theta) &= (A - B)\sin \theta - C \sin 2\theta - D \sin 3\theta, \\ y(\theta) &= (A + B)\cos \theta + C \cos 2\theta + D \cos 3\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $0 \leq \theta \leq 2\pi$.

Согласно [10], тангенциальные нормальные напряжения в точках, расположенных на контуре выработок, вычисляются по формуле:

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma H(F + G \cos \theta + Q \cos 2\theta)}{K + L \cos \theta + M \cos 2\theta + N \cos 3\theta + R \cos 4\theta}, \quad (3)$$

где

$$F = (1 + \mu)(9D^2 + 4C^2 - A^2) + BS;$$

$$G = 2C((1 + \mu)(B + 6D) + S);$$

$$Q = (1 + \mu)(A + 3D)B + (3D - A)S;$$

$$K = A^2 + B^2 + 4C^2 + 9D^2;$$

$$L = 4C(B + 3D);$$

$$M = 2B(3D - A);$$

$$N = -4AC;$$

$$S = (A - D)^{-1}((1 + \mu)(A + D)B - 2(1 - \mu)A^2);$$

γ — объемный вес пород; μ — коэффициент бокового распора; H — глубина заложения выработки.

Автор [10] рассматривает задачу о форме сечений горных выработок при условии равенства нулю численных значений тангенциального нормального напряжения в точках, лежащих на границе выработки (кроме точек возврата). Положив $\sigma_\theta = 0$ и исходя из положения о том, что не существует такого значения угла θ , при котором $\cos \theta = \cos 2\theta = 0$, из соотношения (3) получим

$$F = 0, \quad G = 0, \quad Q = 0. \quad (4)$$

Таким образом, полученные в [10] коэффициенты отображающей функции (1), зависят только от коэффициента бокового распора μ , т. е.

$$A = A(\mu), \quad B = B(\mu), \quad C = C(\mu), \quad D = D(\mu). \quad (5)$$

Назначая различные численные значения коэффициента бокового распора μ и используя формулы (2) и (4), можно получить соответствующие этим значениям μ формы сечений горных выработок.

Так при величине коэффициента бокового распора $\mu = 0,2$ численные значения коэффициентов отображающей функции (1) становятся равными

$$A = -\frac{3h}{8},$$

$$D = -\frac{h}{8},$$

$$B = C = 0,$$

а граница внешности полуплоскости имеет форму астроида.

На рисунке 4 приведены формы кривых, являющихся границами отверстий в плоскости, каждая из которых отвечает определенному значению коэффициента бокового распора при условии, что в любой точке этой границы (кроме точек возврата) численные значения напряжения $\sigma_\theta = 0$.

Приведенные ниже очертания границ горизонтальных выработок являются рациональными с точки зрения отсутствия напряжений σ_θ в точках этих границ. Однако такие формы сечения выработок являются нетехнологичными с точки зрения проходки таких выработок. На практике достаточно часто используются выработки трапециевидного поперечного сечения, в точках границ которого возникают как отрицательные (сжимающие), так и положительные (растягивающие) напряжения σ_θ и, как следствие, могут быть точки с нулевыми значениями напряжения σ_θ [11].

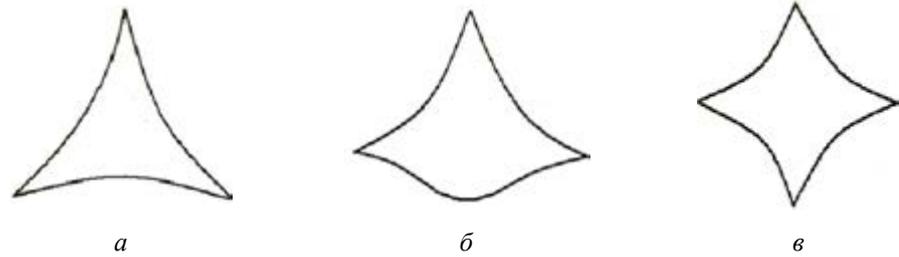


Рис. 4. Подземные выработки со «свободными» от напряжений σ_0 контурами при:
 $a - \mu = 1$; $б - \mu = 0,5$; $в - \mu = 0,2$ [10]

Пример

Рассмотрим подземную горизонтальную выемку, имеющую технологичную форму поперечного сечения.

Функция

$$z = \omega(\zeta) = i(-7,2911\zeta^{-1} - 0,314\zeta + 0,7278\zeta^2 + 0,6052\zeta^3) \quad (6)$$

осуществляет конформное отображение внутренности единичного круга на трапециевидную границу внешности плоскости, изображенной на рис. 5, а. На оси θ существуют точки, являющиеся образами точек единичной окружности:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= 0; \\ \theta'_0 &= 2\pi \approx 6,28; \\ \theta_1 &= 0,55; \\ \theta_2 &= 2,85; \\ \theta_3 &= 3,44; \\ \theta_4 &= 5,73; \\ \theta_1^{\min} &= 0,95; \\ \theta_2^{\min} &= 5,33, \end{aligned}$$

которые при конформном отображении (6) являются границами участков перемены знаков и изменяющегося характера поведения значений тангенциального нормального напряжения. Так, на участках $\theta_0 - \theta_1$, $\theta_2 - \theta_3$, $\theta_4 - \theta'_0$, ($\theta'_0 = 2\pi \approx 6,28$) контура действуют растягивающие напряжения, на участках $\theta_1 - \theta_2$, $\theta_3 - \theta_4$ контура действуют сжимающие напряжения и, следовательно, в точках $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ значения напряжения равны нулю. При $\mu = 0,2$ в точках θ_1^{\min} и θ_2^{\min} напряжение достигает минимального значения, равного $\sigma_0 = -5,66\gamma H$, а максимального значения, равного $\sigma_0 = 0,55\gamma H$ напряжение достигает в точке θ_0 при $\theta = 3,14$, т. е. в точке контура, находящейся на оси ординат между точками θ_2 и θ_3 , значение напряжения достигает локального максимума, равного $\sigma_0 = 0,29\gamma H$ (рис. 5, б).

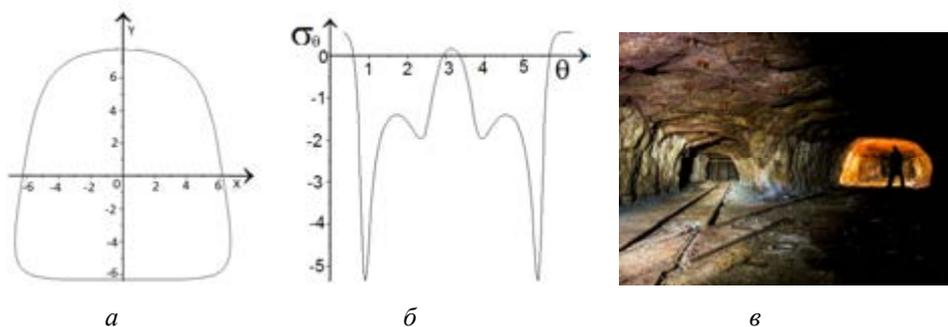


Рис. 5. Горизонтальная выемка с технологичным поперечным сечением:
 а — трапециевидная внешность плоскости, отображаемой функцией (б);
 б — распределение напряжений σ_θ в точках границы выработки, как в образах точек, лежащих на единичном круге; в — реально существующая горизонтальная подземная выработка (штрек) технологичного трапециевидного поперечного сечения (цитируется по fairysoft.ru)

Теперь, зная численные значения напряжений в точках контура выработки, можно рассчитывать ее на прочность (устойчивость).

II. Определение максимальной глубины заложения горизонтальной выработки

Напряжения в точках контура подземной выработки, а, значит, и ее устойчивость, при всех прочих равных условиях зависят от глубины ее заложения H_3 . Чем больше глубина, тем интенсивнее поле напряжений. Следовательно, под максимальной глубиной заложения можно понимать (если не учитывать всяческие коэффициенты запаса) такую величину H_3 , увеличение которой на бесконечно малую величину влечет за собой потерю устойчивости выработкой, т. е. ее разрушение.

Для определения предельной глубины заложения горизонтальной выработки нами используется условие отсутствия на контуре выработки точек, в которых напряжения σ_θ превосходят пределы прочности вмещающей породы как при растяжении, так и при сжатии [12], т. е.

$$R_c \leq \sigma_\theta \leq R_{\text{рас}}. \quad (7)$$

Например, определим предельную глубину заложения выработки с поперечным сечением в виде круга диаметром 3 м. В качестве вмещающих пород примем глинистый сланец с объемным весом $\gamma = 3,05 \text{ т/м}^3$ и пределами прочности при сжатии и растяжении равными $R_c = 40 \text{ МПа}$ и $R_{\text{рас}} = 1,0 \text{ МПа}$ и известняк с объемным весом $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$ и соответствующими пределами прочности равными $R_c = 80 \text{ МПа}$ и $R_{\text{рас}} = 5 \text{ МПа}$.

Величина коэффициента бокового давления (распора) в обоих случаях принята равной $\mu = \xi_o = 0,2$.

На рисунке б приведены картины изолиний вертикальных σ_z , горизонтальных σ_x и касательных напряжений τ_{zx} в окрестности горизонтальной выработки круглого сечения, пройденной в известняке на глубине $H_3 = 600 \text{ м}$. Расчеты по вычислению напряжений выполнены при помощи компьютерной программы [13].

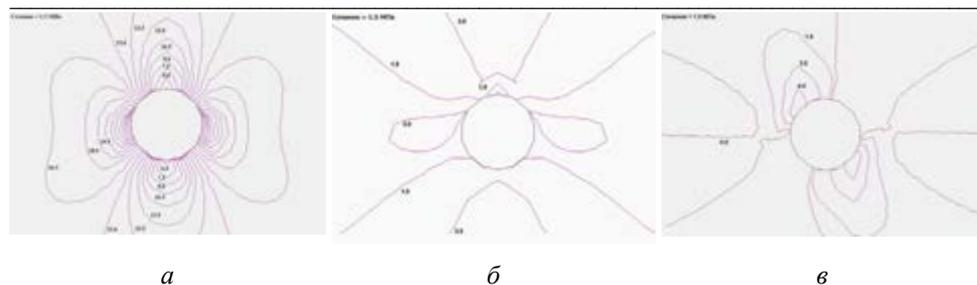


Рис. 6. Изолинии компонент напряжения: *a* — вертикальных σ_z ; *б* — горизонтальных σ_x ; *в* — τ_{xz} в окрестности горизонтальной выработки круглого сечения, пройденной в известняке на глубине $H_3 = 600$ м

Величина напряжения σ_θ (рис. 7) выражается через компоненты напряжения σ_z , σ_x и τ_{xz} с учетом перенаименования координатных осей и изменения их направлений известным образом [14, 15]:

$$\sigma_\theta = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_z \cos^2 \theta - 2\tau_{xz} \sin \theta \cos \theta. \quad (8)$$

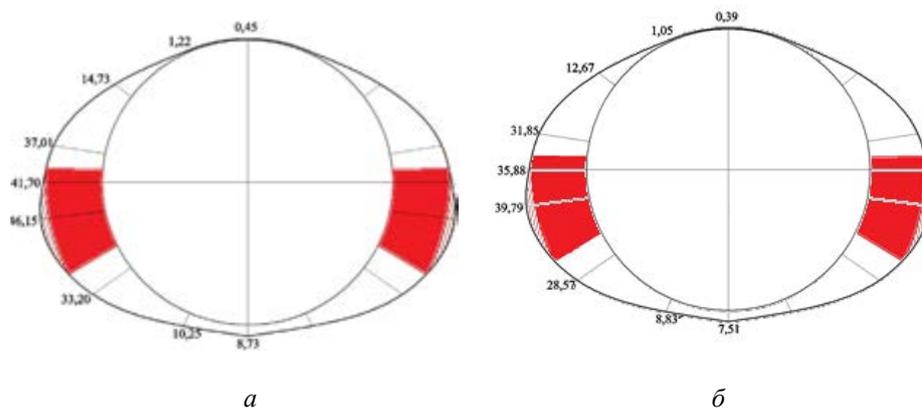


Рис. 7. Эпюры напряжения σ_θ , построенные по периметру горизонтальной выработки круглого сечения: *a* — пройденной в известняке на глубине 1000 м; *б* — в глинистом сланце на глубине 800 м; участки периметра, на которых не выполняется правая часть неравенства (7), показаны красным цветом

На рисунке 8 изображены картины изолиний главных нормальных напряжений во вмещающей выработку породе, приведенные в работе В. А. Дрибана [16] и полученные с учетом того, что, по словам автора, «процесс деформирования гетерогенных структур даже в случае абсолютной симметрии внешних воздействий (круглая выработка, симметричное нагружение, однородный вмещающий массив) уже несет в себе неоднородную компоненту, которая заключается в способности геосреды находиться в различных фазах (состояниях)» [16].

Не дискутируя на эту тему, отметим, что если исключить упомянутую выше «неоднородную компоненту» (используемая нами математическая модель предполагает вмещающий массив однородным и изотропным по всем направлениям), то будем иметь две симметричные зоны разрушения,

положение которых практически совпадает с тем, что определено нами в процессе численного эксперимента.

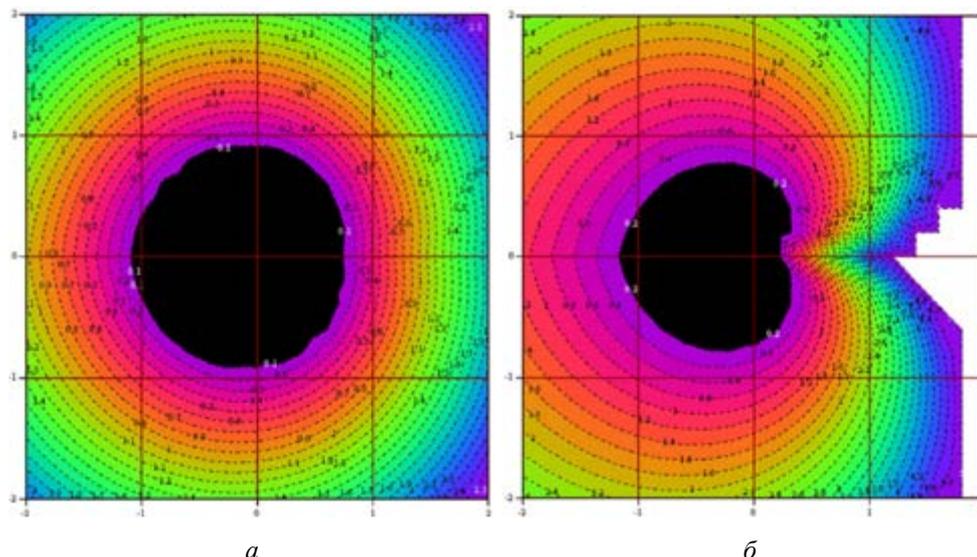


Рис. 8. Изолинии главных нормальных напряжений вокруг круглой выработки:
a — «за два шага до»; *б* — «в момент потери устойчивости» [16]

Аналогичные результаты приводятся в работах и других авторов [17—21].

III. Вычисление осадок дневной поверхности

В наших работах [22, 23] приведены результаты численного моделирования процесса оседания земной поверхности при условии, что на некоторой глубине отработаны горизонтальные подземные выработки квадратного и полуэллиптического сечения.

Показано, что, если вмещающий массив однороден и изотропен, то величина максимального перемещения точки земной поверхности, расположенной на оси симметрии выработки, зависит от величины коэффициента бокового распора, глубины заложения выработки H , размеров и формы ее поперечного сечения. Причем, при всех прочих равных условиях, перемещение этой точки всегда значительно меньше, если форма поперечного сечения представляет собой полуэллипс. При этом мутьда оседания для всех рассмотренных вариантов расчета имеет седлообразную форму, что иллюстрируется рис. 9, где в качестве примера приведены соответствующие графические зависимости для случая полуэллиптической выработки. Этот результат согласуется с результатами натурных наблюдений и теоретических исследований других авторов [24—29].

При увеличении коэффициента бокового распора вмещающей породы μ и глубины заложения выработки величины вертикальных смещений точек дневной поверхности уменьшаются при всех прочих равных условиях. А увеличение геометрических размеров поперечного сечения выработки, напротив, во всех случаях ведет к росту соответствующих смещений.

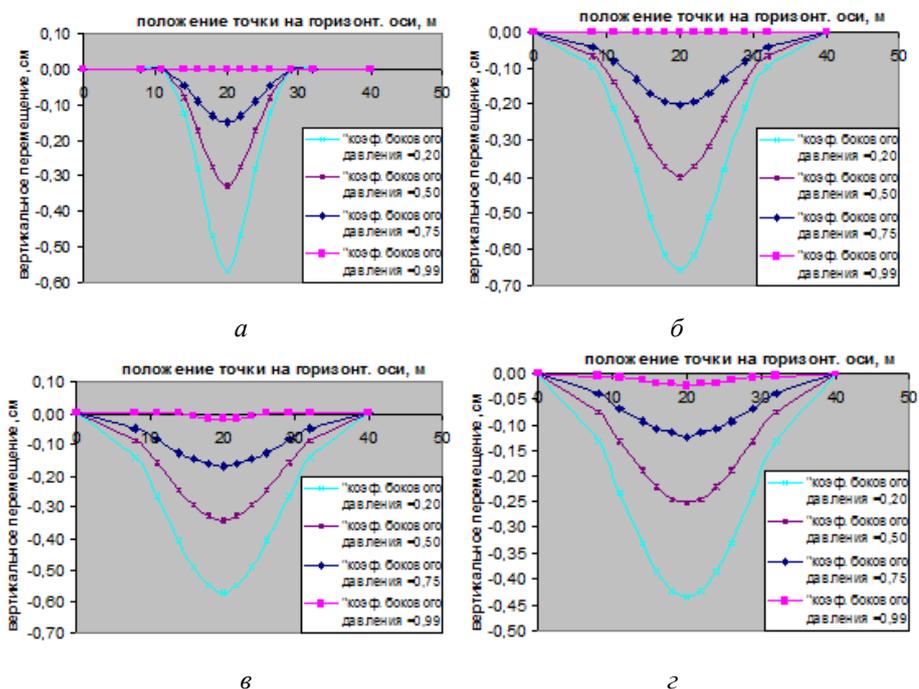


Рис. 9. Графики оседания земной поверхности над подземной выработкой (полуэллипс размером 4×4 м): а — отработанной на глубине 5,2 м; б — 10,0 м; в — 15,2 м; г — 20 м, при различных численных значениях $\mu = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$

Ниже представлены результаты вычисления просадок дневной поверхности, когда форма поперечного сечения выработки представляет собой квадрат размерами $2,4 \times 2,4$ м; $4,0 \times 4,0$ м; $8,0 \times 8,0$ м, а также круг, полуэллипс, дельтоиду и астроида, вписанные в квадраты соответствующих размеров (рис. 10). Принято, что глубина заложения выработок $H = 5,2$ м; 10,0 м; 15,2 м и 20 м, а величина коэффициента бокового распора $\mu = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$.

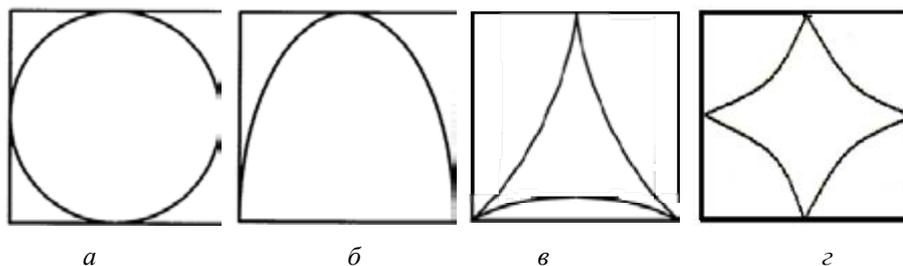


Рис. 10. Формы поперечного сечения подземной выработки:
а — круг, вписанный в квадрата; б — полуэллипс; в — дельтоида; г — астроида

На рисунке 11 в качестве примера приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(H_z)$, которые показывают, как изменяются величины вертикального смещения точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработок с сечением в виде квадрата, круга, половины эллипса, дельтоиды и астроида по мере увеличения глубины их заложения.

Качественный анализ показывает, что для выработок с любой из рассмотренных форм поперечного сечения, при значениях коэффициента бокового распора $\mu \geq 0,75$ кривые вогнуты вниз, у каждой из кривых имеется локальный максимум, который соответствует глубине заложения $H_3 = 10$ м. При $\mu = 0,99$ знак кривизны меняется на противоположный, кривые становятся выпуклыми, за исключением оговариваемых ниже кривых, построенных для выработок размером $8,0 \times 8,0$ м и расположенных на глубине 20 м.

Исключением являются кривые, соответствующие выработкам квадратного сечения размером 4×4 м при коэффициенте бокового распора вмещающей породы $\mu \leq 0,75$, а также с размером 8×8 м при всех значениях μ . Причем эти кривые достаточно точно аппроксимируются прямыми.

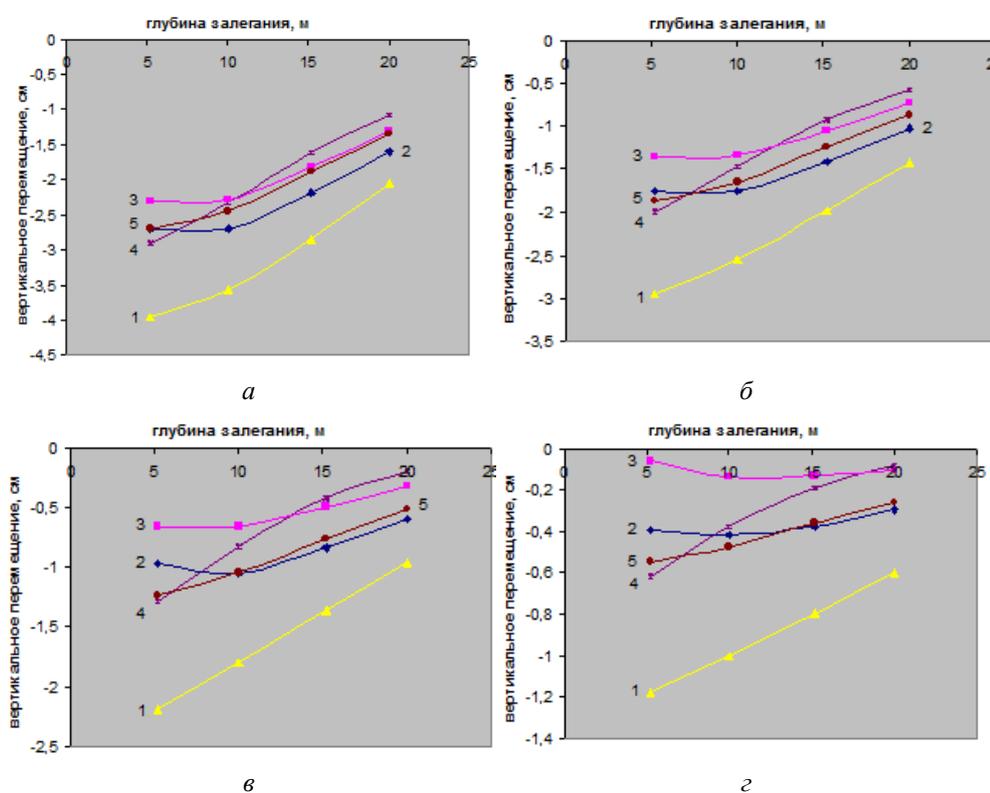


Рис. 11. Кривые вида $\delta = f(H_3)$ для выработок с поперечным сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3), дельтоиды (4) и астроида (5), при их поперечном размере 8×8 м и величине коэффициента бокового распора вмещающей породы: а — $\mu = 0,2$; б — $\mu = 0,5$; в — $\mu = 0,75$; з — $\mu = 0,99$

На рисунке 12 приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(\mu)$, построенные для выработок размером $2,4 \times 2,4$ м с поперечным сечением в виде квадрата, круга, полуэллипса, дельтоиды и астроида, расположенных на глубине 5,2 м; 10 м; 15,2 м и 20 м. Из этого рисунка видно, что рассматриваемая зависимость является практически линейной. Этот вывод может быть отнесен и к другим рассмотренным вариантам расчета.

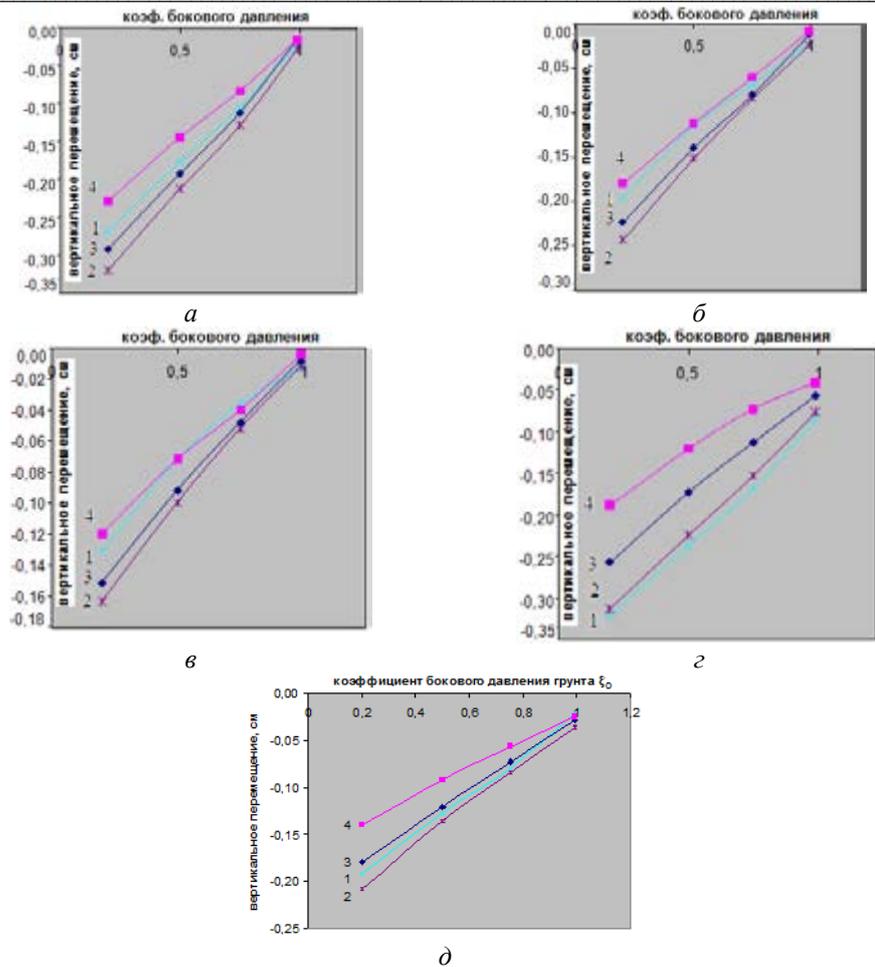


Рис. 12. Кривые вида $\delta = f(\mu)$ для выработок размером $2,4 \times 2,4$ м с поперечным сечением в виде: *а* — квадрата; *б* — круга; *в* — полуэллипса; *г* — дельтоиды; *д* — астроида, расположенных на глубине 5,2 м (1); 10 м (2); 15,2 м (3) и 20 м (4)

На рисунке 13 приведены функциональные поверхности вида $S = f(\mu; H_3)$ для подземных выработок, имеющих форму поперечного сечения в виде квадрата, круга, половины эллипса, дельтоиды и астроида, по которым можно судить о влиянии величины коэффициента бокового распора и глубины заложения выработки на величину осадки точек, лежащих на дневной поверхности. Очевидно, что рассматриваемая зависимость весьма сложна: все изображенные поверхности имеют двойную кривизну, однако существуют общие закономерности: при увеличении численных значений коэффициента бокового распора μ и глубины заложения выработки H_3 осадки дневной поверхности уменьшаются, а при увеличении поперечного размера выработок, напротив, растут. Если ранжировать формы сечений горизонтальных выработок в порядке возрастания осадки дневной поверхности, то при всех прочих равных условиях получим ряд: астроида, полуэллипс, круг, квадрат и дельтоида. Следует отметить, что две последние формы поперечного сечения выработки в некоторых случаях меняются лидерством.

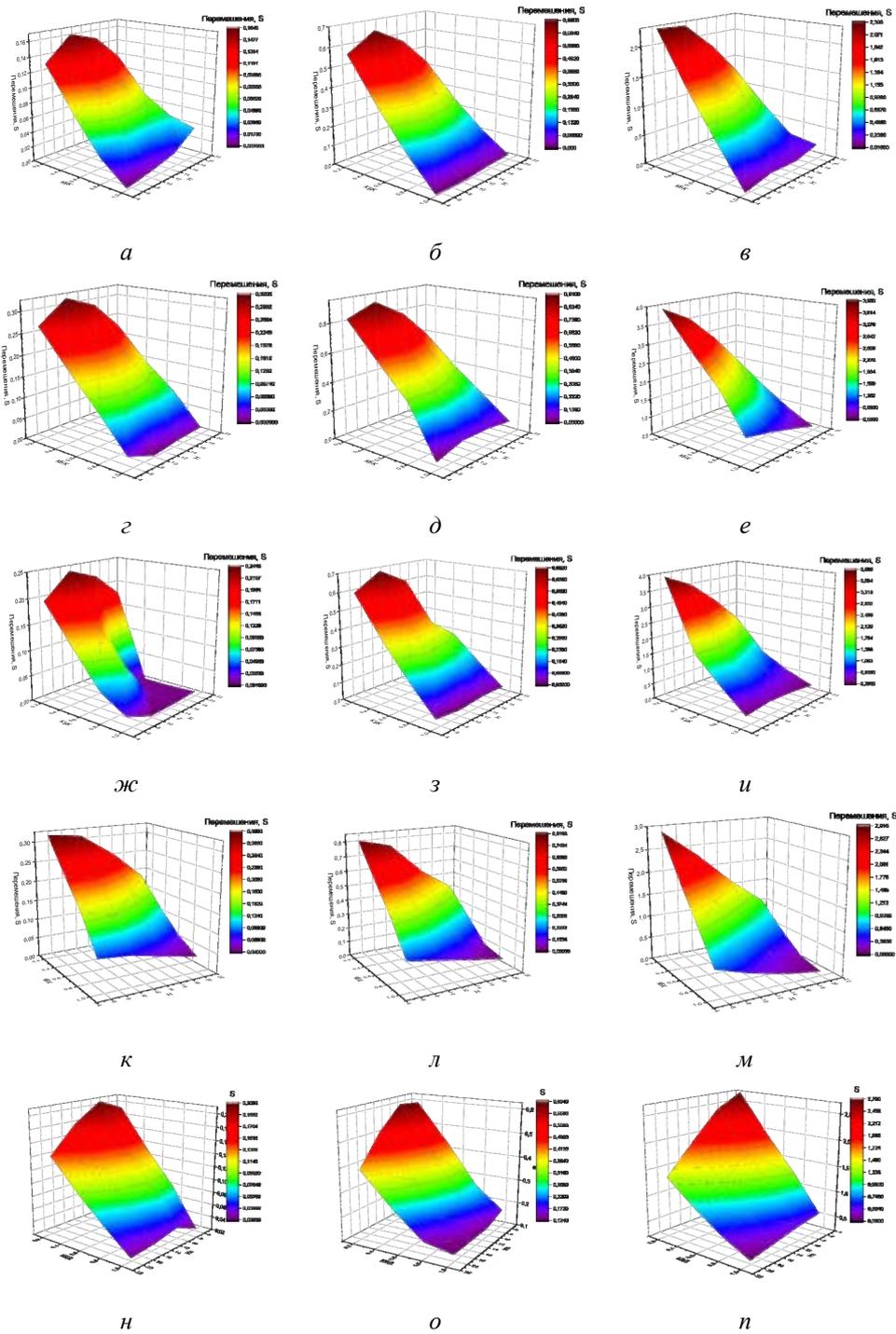


Рис. 13. Функциональные поверхности вида $S = f(\mu; H_3)$ для подземных выработок, имеющих форму поперечного сечения в виде: *a*–*в* — квадрата; *г*–*е* — круга; *ж*–*и* — половины эллипса; *к*–*л* — дельтоиды; *м*–*п* — астроида (см. рис. 10), которые вписываются в эталонный квадрат со стороной 2,4 м (*a*, *г*, *ж*, *к*, *м*), 4 м (*б*, *д*, *з*, *л*, *н*) и 8 м (*в*, *е*, *и*, *м*, *п*)

Заключение

1. Использование методов теории функций комплексного переменного позволяет отыскивать так называемые рациональные (определение автора работы [10]) формы поперечного сечения подземной выработки, которые свободны (кроме точек возврата) от напряжений σ_0 , но не все из которых являются технологичными с точки зрения проходки. Однако использование МТФКП позволяет построить технологичные контуры и получить аналитическое решение задачи об определении напряжений в окрестности выработки и на ее поверхности. Пример такого решения приведен в статье.

2. Для определения предельной глубины заложения выработки предложен критерий устойчивости, использование которого дает результаты, качественно совпадающие с результатами, полученными сторонними исследователями.

3. Для отыскания величины оседания дневной поверхности следует использовать численные методы, т. к. только при их применении можно учесть максимальное количество факторов, определяющих значения осадок. Одним из основных таких факторов является форма поперечного сечения выработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Степанова Е. А. Задача об отыскании рациональной формы свода горизонтальной подземной выработки // Инженерные подходы к решению геотехнических задач: сб-к научн. трудов, посвященный 80-летию Константина Шагеновича Шадунца. Краснодар : КубГАУ, 2013. 211 с.
2. Стажевский С. Б. К выбору формы и креплению выработок // ФТПРПИ. 1986. № 5. С. 27—32.
3. Протодяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. М.-Л. : ОГИЗ, 1931. 186 с.
4. Килессо С. К. Архитектура Крыма. Киев : Будівельник, 1983. 96 с.
5. Барышников В. Д., Машуко В. И., Пирля К. В. Анализ напряженного состояния горных пород в окрестности подготовительных выработок // ФТПРПИ. 1982. № 4. С. 114—116.
6. Битаров В. Т., Пустобриков В. Н. Факторы, определяющие равновесие системы «порода — крепь» // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: сб-к научн. трудов. Вып. 15. Донецк : Норд-Пресс, 2009. С. 43—48.
7. Литвинский Г. Г. Основоположник отечественной науки о горном давлении (памяти профессора М. М. Протодяконова посвящается) // Сб-к науч. трудов ДонГТУ. № 32. Алчевск : ДонГТУ, 2010. С. 5—13.
8. Кучер Б. Ф., Моисеев Д. Ф., Сазонов А. В. Образование воронок-провалов на карьере ПАО «ЦГОК» // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: сб-к научн. трудов. Вып. 15. Донецк : Норд-Пресс, 2009. С. 34—38.
9. Рябичев В. Д., Кобзарь Ю. И., Нор С. М. Изучение устойчивости сильнообводненной кровли разведочно-дренажного штрека шахты «Комсомольская» // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: сб-к научн. трудов. Вып. 15. Донецк : Норд-Пресс, 2009. С. 93—95.
10. Цветков В. К. Определение форм сечения горных выработок с заданными напряжениями на их контурах // ФТПРПИ. 1986. № 2. С. 24—29.
11. Постановка задачи «о восстановлении сечения контура» подземной выработки / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Прокопенко // Геология, поиск и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: мат-лы всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Геонауки — 2013: актуальные проблемы изучения недр». Вып. 13. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. 400 с.
12. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. А. Шубин, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Соловьев // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf).

13. Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние): свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков, С. И. Шиян // ВолгГАСУ, 2009.
14. Анализ напряженного состояния грунтового массива, вмещающего подземные пространства различной конфигурации / А. Н. Богомолов, С. В. Кузнецова, В. Н. Синяков, М. А. Шубин, В. П. Дыба, Г. М. Скибин, Ю. И. Олянский, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительная информатика. 2012. Вып. 8(24). URL: www.vestnik.vgasu.ru.
15. *Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Богдан А. В.* Устойчивость круглой и полуэллиптической выработки, пройденных в изотропном грунтовом откосе на уровне его подошвы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 45(64). С. 4—11.
16. *Дрибан В. А.* Механизм формирования зоны необратимых деформаций вокруг выработок // Проблемы гірського тиску: зб. наук. пр. 2010. № 18. С. 73—93.
17. *Haimson B., Lee H.* Borehole breakouts and compaction bands in two high-porosity sandstones // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. Vol. 41. Iss. 2. Pp. 287—301.
18. *Cuss R. J., Rutter E. H., Holloway R. F.* Experimental observation of the mechanics of bore-hole failure in porous sandstone // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2003. Vol. 40. Pp. 747—761.
19. *Grueschow E., Rudnicki J. W.* Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // International Journal of Solids and Structures. 2005. Vol. 42. Pp. 4574—4587.
20. *Stefanov Yu. P., Chertov M. A., Aidagulov G. R., Myasnikov A. V.* Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59. Pp. 2323—2340.
21. *Stefanov Yu. P.* Numerical modeling of deformation and failure of sandstone specimens, Journal of Mining Science. 208. Vol. 44. No. 1. Pp. 64—72.
22. Численный анализ оседания земной поверхности над горизонтальными выработками / А. Н. Богомолов, Е. А. Степанова, О. А. Богомолова, Е. В. Цветкова, Е. М. Либурацков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 45(64). С. 12—26.
23. *Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Stepanova E. A., Ushakov A. N.* Influence of the shape and dimensions of the cross section of underground workings on the magnitude of the rainfall surface // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture. 2017. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 123—134. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.13.
24. Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна / Ф. К. Низаметдинов, Д. В. Мозер, Н. И. Гей, А. С. Туякбай, А. Д. Каранеева // Геоматика. 2014. № 4. С. 70—77.
25. *Карасев М. А.* Прогноз оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Записки Горного института. Т. 204. СПб. : Горный институт, 2013. С. 248—254.
26. *Петрухин В. П., Исаев О. Н., Шарафутдинов Р. Ф.* Определение зоны влияния строительства коммуникационных тоннелей // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 4. С. 24—27.
27. *Conway B. D.* Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA // Hydrogeol. J. 2016. Vol. 24. Iss. 3. Pp. 649—655.
28. *Deverel S. J., Rojstaczer S.* Subsidence of agricultural lands in the Sacramento-San Joaquin Delta, California: role of aqueous and gaseous carbon fluxes // Water Resour. Res. 1996. Vol. 32. Iss. 8. Pp. 2359—2367.
29. *Tzampoglou P., Loupasakis C.* Numerical simulation of the factors causing land subsidence due to overexploitation of the aquifer in the Amyntaio open coal mine, Greece // HydroResearch. 2019. Vol. 1. Pp. 8—24. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2589757819300034](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589757819300034).

© Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Пономарев А. Б., 2025

Поступила в редакцию
в декабре 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Пономарев А. Б. Предложения по решению некоторых задач о подземных выработках // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 1(98). С. 6—20. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_6.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., ОАО «НПЭК ОиФ». Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Телевизионная, 15; banzaritcyn@mail.ru

Богомолова Оксана Александровна — канд. техн. наук, доц. каф. математических и естественнонаучных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Пonomarev Андрей Будимирович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. промышленного и гражданского строительства, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. Российская Федерация, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. ORCID: 0000-0001-6521-9423

Alexander N. Bogomolov^a, Oksana A. Bogomolova^b, Andrey B. Ponomaryov^c

^a *JSC “NPEK OIF”*

^b *Volgograd State Technical University*

^c *Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II*

SUGGESTIONS FOR SOLVING SOME OF THE PROBLEMS OF UNDERGROUND MINING

Proposals for solving some of the problems of horizontal underground workings are presented. The problem of “rational” cross-sectional shapes of an underground mine and finding the stress state in its vicinity and on its surface is considered. An approach to determining the maximum depth of a horizontal underground mine is proposed, based on the stability criterion, which assumes that at points on the surface of the mine workings, the values of normal tangential stresses should not exceed the tensile and compressive strength limits of the host rock. It is shown that to determine the precipitation of the daytime surface located above the mine, it is necessary to use numerical methods, because only with their help can the maximum number of factors determining the precipitation values be taken into account.

К e y w o r d s: horizontal underground mining, drift, cross-section of the excavation, “rational” section, maximum depth of laying, stability criterion, numerical methods, precipitation of the daytime surface.

For citation:

Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Ponomaryov A. B. [Suggestions for solving some of the problems of underground mining]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 1, pp. 6—20. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_6.

About authors:

Alexander N. Bogomolov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, JSC “NPEK OIF”. 15, Televizionnaya st., Novosibirsk, Russian Federation; banzaritcyn@mail.ru

Oksana A. Bogomolova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Andrey B. Ponomaryov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II. 2, 21 Line st., Vasilevskiy island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6521-9423