

Критериальная оценка предельной глубины заложения горизонтальной выработки

УДК 624.131

Богомолова О.А.

Канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (г. Волгоград);
e-mail: boazaritcyn@mail.ru

Богомолов А.Н.

Д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (г. Волгоград);
e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Статья получена: 02.12.2019. Рассмотрена: 04.12.2019. Одобрена: 30.12.2019. Опубликовано онлайн: 31.12.2019. ©РИОР

Аннотация. В работе приведены результаты исследования по определению технологичных контуров горизонтальных подземных выработок и предельной безопасной глубины их заложения. Критерием определения предельной глубины может служить условие отсутствия на контуре выработки точек, в которых тангенциальное нормальное напряжение превосходит пределы прочности вмещающей породы при растяжении и сжатии. Результаты решения задачи о нахождении зон разрушения на контуре выработки круглого сечения находятся в удовлетворительном качественном соответствии с полученным независимо от авторов результатом.

Ключевые слова: отображающая функция, горизонтальная выработка, напряженное состояние вмещающего массива — напряжения на контуре выработки, коэффициент бокового давления (распора), предельная глубина заложения, критерий устойчивости, зоны разрушения.

Интенсивное освоение подземного пространства, связанное с подземным строительством, стимулирует проведение исследований, на-

правленных на определение рациональных геометрических параметров выработок с целью минимизации затрат на их укрепление при дальнейшей эксплуатации.

При этом одним из критериев оценки степени рациональности этих параметров может служить величина максимальной глубины заложения выработки, при которой не требуется проведения специальных работ по ее закреплению.

Профессор В.К. Цветков предположил, что необходимости проводить укрепление ствола выработки не возникает, если ее контур свободен от тангенциальных нормальных напряжений σ_θ , т.е. в каждой его точке выполняется условие

$$\sigma_\theta = 0. \quad (1)$$

Применяя методы теории функций комплексного переменного [1], он решил задачу о нахождении формы контура подземной выработки свободной от напряжений σ_θ [2; 3], используя при этом отображающую функцию

CRITERIA EVALUATION OF THE LIMIT DEPTH OF HORIZONTAL PRODUCTION

Oksana Bogomolova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd; e-mail: boazaritcyn@mail.ru

Aleksandr Bogomolov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd; e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Manuscript received: 02.12.2019. **Revised:** 04.12.2019. **Accepted:** 30.12.2019. **Published online:** 31.12.2019. ©РИОР

Abstract. The paper presents the results of a study to determine the technological contours of horizontal underground workings

and the maximum safe depth of their laying. The criterion for determining the limiting depth can be the condition that there are no points on the output circuit at which the stresses the tangential normal stress exceeds the tensile and compressive strengths of the host rock. The results of solving the problem of finding fracture zones on a circular cross-section working circuit are in satisfactory qualitative agreement with the result obtained independently of the authors.

Keywords: display function, horizontal output, stress state of the enclosing array — stresses on the output circuit, lateral pressure coefficient (thrust), maximum depth of laying, stability criterion, fracture zones.

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

где A, B, C, D — действительные коэффициенты, осуществляющие конформное отображение внутренности единичного круга $|\zeta| < 1$ на внешность бесконечной односвязной области, границей которой является простая замкнутая кривая.

В результате установлено, что каждому из встречающихся в природе значений коэффициента бокового давления ξ_0 , соответствует особое, только ему присущее очертание контура выработки, свободного от напряжения σ_θ (рис. 1).

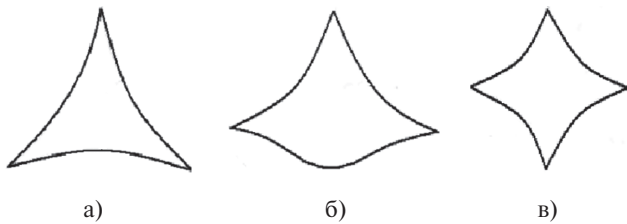


Рис. 1. Очертания подземных выработок со «свободными» от напряжений контурами при значениях коэффициента бокового распора $\xi_0 = 1$ (а); $\xi_0 = 0,5$ (б) и $\xi_0 = 0,2$ (в) (цитируется по работам [2; 3])

Проходка выработок таких «экзотических» сечений, как те, что приведены на рис. 1, является весьма сложным делом, поэтому, используя ту же отображающую функцию, решим задачу о построении контуров сечений горных выработок более простой и «технологичной» с точки зрения отработки выработки, конфигурации.

Сформулируем постановку задачи следующим образом: пусть на границе горной выработки заданной высоты h дано распределение значений компоненты тангенциального нормального напряжения $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}, \dots, \sigma_{\theta_n}$. Необходимо определить форму сечения горной выработки и построить эпюру значений напряжений σ_θ , действующих в точках этого контура.

Заметим, что более «мягким» по сравнению с критерием (1) условием для определения предельной глубины заложения выработки может служить отсутствия на ее контуре точек, в которых напряжения σ_θ превосходят пределы прочности вмещающей породы при растяжении и при сжатии, т.е.

$$R_c \leq \sigma_\theta \leq R_{\text{пас}}. \quad (3)$$

Задачу решаем следующим образом. Положив $\zeta = \cos\theta + i\sin\theta$ и, отделяя действительные и мнимые части в (1), получим параметрические уравнения упомянутой выше кривой в виде

$$x(\theta) = (A - B)\sin\theta - C\sin 2\theta - D\sin 3\theta; \quad (4)$$

$$y(\theta) = (A + B)\cos\theta + C\cos 2\theta + D\cos 3\theta,$$

где $0 \leq \theta \leq 2\pi$.

Согласно [2] тангенциальные нормальные напряжения в точках, расположенных на контуре выработок, вычисляются по формуле

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma H (F + G \cos\theta + Q \cos 2\theta)}{K + L \cos\theta + M \cos 2\theta + N \cos 3\theta + R \cos 4\theta}, \quad (5)$$

где γ — объемный вес вмещающих пород; H — глубина заложения выработки;

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

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

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

$$K = A^2 + B^2 + 4C^2 + 9D^2; \quad (6)$$

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

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

$$N = -4AC;$$

$$R = -6AD;$$

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

Ясно, что первое из соотношений (3) является нечетной, а второе — четной функцией аргумента θ , поэтому все контуры будут симметричными относительно оси OY .

Сначала определим точки на контуре, в которых тангенциальное нормальное напряжение обращается в нуль, решая уравнение

$$F + G\cos\theta + Q\cos 2\theta = 0, \quad (7)$$

где коэффициенты F, G и Q определяются первыми тремя соотношениями (6) и, следовательно, зависят от коэффициентов отображающей функции (2) и коэффициента бокового распора μ .

Решая задачу об определении форм сечений подземных выработок со «свободными» от напряжений σ_θ контурами, профессор В.К. Цветков полагал, что при $\sigma_\theta = 0$ выполняются условия $F = 0, G = 0, Q = 0$, что соответствует тожде-

ственному равенству нулю тангенциального нормального напряжения. Нас же будут интересовать те значения аргумента $\theta (0 \leq \theta \leq 2\pi)$, при которых имеет место равенство (7).

Переписывая равенство (7) в виде

$$2Q\cos^2\theta + G\cos\theta + F - Q = 0, \quad (7')$$

получим квадратное уравнение относительно $\cos\theta$. Поскольку $|\cos\theta| \leq 1$, то ясно, что уравнение (7') на отрезке $0 \leq \theta \leq 2\pi$ имеет не более четырех корней, причем если θ_1 и $\theta_2 (|\theta_1| < |\theta_2|)$ — корни данного уравнения на отрезке $0 \leq \theta \leq \pi$, то $2\pi - \theta_2$ и $2\pi - \theta_1$ корни рассматриваемого уравнения на отрезке $\pi \leq \theta \leq 2\pi$.

Приведем несколько результатов решения поставленной выше задачи в виде ряда примеров построения контуров кривых (4) в зависимости от количества и численных значений корней уравнения (7') при значении коэффициента бокового распора $\mu = 0,2$.

Пример 1. Пусть уравнение (7') на участке $0 \leq \theta \leq \pi$ имеет два корня, таких, что $\cos\theta_1 = 0,86$, $\cos\theta_2 = -0,96$.

Тогда отображающая функция (2) имеет вид

$$z = \omega(\zeta) = i(-7,3\zeta^{-1} - 0,3\zeta + 0,7\zeta^2 + 0,6\zeta^3). \quad (8)$$

Функция (8) отображает внутренность единичного круга на плоскость с трапецевидным вырезом, изображенным на рис. 2, а. На контуре отмечены точки, являющиеся образами точек единичной окружности $\theta_0 = 0$; $\theta_1 = 0,55$; $\theta_2 = 2,85$; $\theta_3 = 3,44$; $\theta_4 = 5,73$, определяющие интервалы перемен знаков тангенциального нормального напряжения. На участках $\theta_0 - \theta_1$, $\theta_2 - \theta_3$, $\theta_4 - \theta'_0$, ($\theta'_0 = 2\pi \approx 6,28$) контура действуют положительные (растягивающие) напряжения, на участках $\theta_1 - \theta_2$, $\theta_3 - \theta_4$ контура действуют отрицательные (сжимающие) напряжения: в точках θ_i , $i = 1, \dots, 4$ значения напряжения равны нулю.

В точках $\theta_1^{\min} = 0,95$ и $\theta_1^{\max} = 5,33$ напряжение достигает минимального значения, равного $\sigma_\theta = -3,64\gamma H$; в точке $\theta_0 = 0$ напряжение достигает максимального значения, равного $\sigma_\theta = 0,55\gamma H$, а 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 $\sigma_\theta = 0,26\gamma H$. На

рис. 2, б приведена эпюра тангенциального нормального напряжения в координатах (θ, σ'_θ) , где $\sigma'_\theta = \sigma_\theta / \gamma H$.

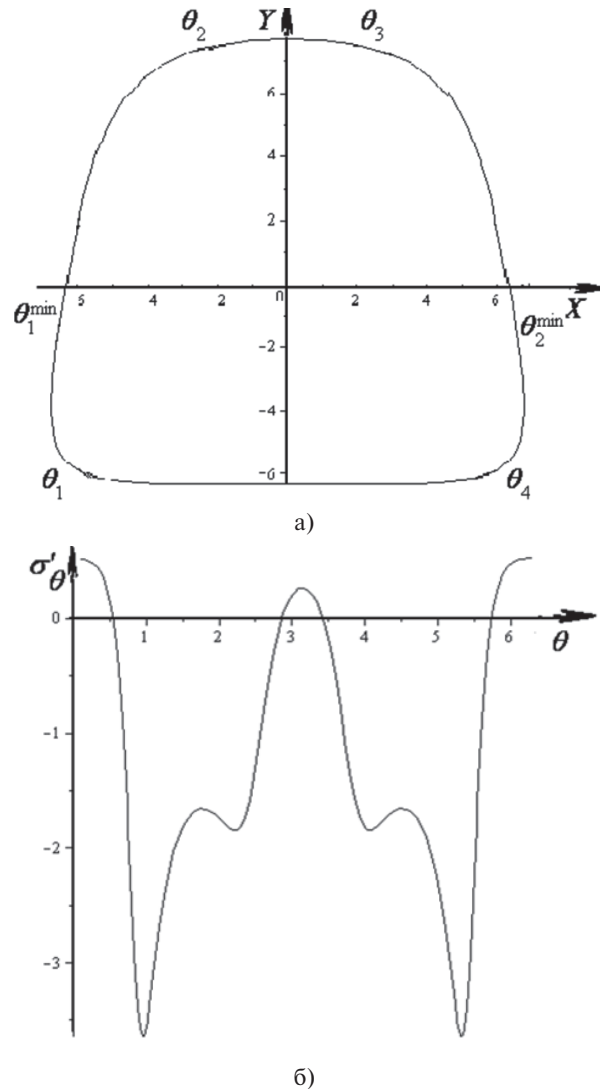


Рис. 2. Контур выработки трапецевидного сечения (а), эпюра тангенциального нормального напряжения (б)

Пример 2. Теперь пусть уравнение (7') на участке $0 \leq \theta \leq \pi$ имеет два корня, таких, что $\cos\theta_1 = 0,98$, $\cos\theta_2 = -0,9$.

Отображающая функция (2) при этом имеет вид

$$z = \omega(\zeta) = i(-8\zeta^{-1} - 3,5\zeta + 0,1\zeta^2 + 0,5\zeta^3). \quad (9)$$

Функция (9) отображает внутренность единичного круга $|\zeta| < 1$ на плоскость с квадратным вырезом, изображенным на рис. 3, а. На контуре отмечены точки, являющиеся образами

точек единичной окружности $\theta_0 = 0; \theta_1 = 0,15; \theta_2 = 3,06; \theta_3 = 3,22; \theta_4 = 6,13$, определяющие интервалы перемен знаков тангенциального нормального напряжения. 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: в точках $\theta_i, i = 1, \dots, 4$ значения напряжения равны нулю. В точках $\theta_1^{\min} = 0,74$ и $\theta_2^{\min} = 5,54$ напряжение достигает минимального значения, равного $\sigma_\theta = -1,99\gamma H$; в точке $\theta_0 = 0$ напряжение достигает максимального значения, равного $\sigma_\theta = 0,13\gamma H$, а 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 $\sigma_\theta = 0,05\gamma H$.

На рис. 3, б приведена эпюра тангенциального нормального напряжения в координатах (θ, σ'_θ) .

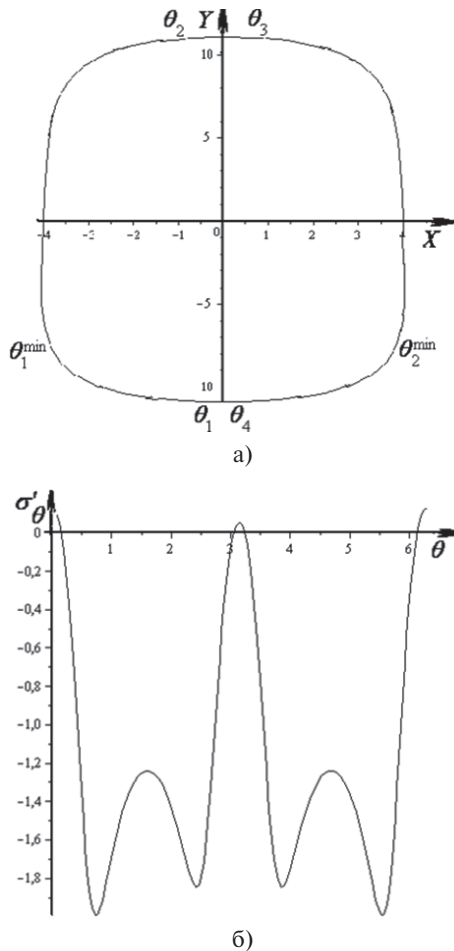


Рис. 3. Контур выработки квадратного сечения (а); эпюра тангенциального нормального напряжения (б)

Пример 3. Не делая подробных выкладок и рассуждений, подобных приведенным выше, предположим, что уравнение (7') на участке $0 \leq \theta \leq \pi$ имеет: а) один корень $\cos\theta = -0,63$; б) один корень $\cos\theta = -0,92$ и в) не имеет корней. Тогда отображающая функция (2) будет иметь соответственно вид

$$z = \omega(\zeta) = i(10,1\zeta^{-1} - \zeta + 3,5\zeta^2 + 0,5\zeta^3); \quad (10)$$

$$z = \omega(\zeta) = i(-\zeta^{-1} + 3,76\zeta + 2\zeta^2 + 0,24\zeta^3); \quad (11)$$

$$z = \omega(\zeta) = i(-30,75\zeta + 8\zeta^2 + 1,25\zeta^3). \quad (12)$$

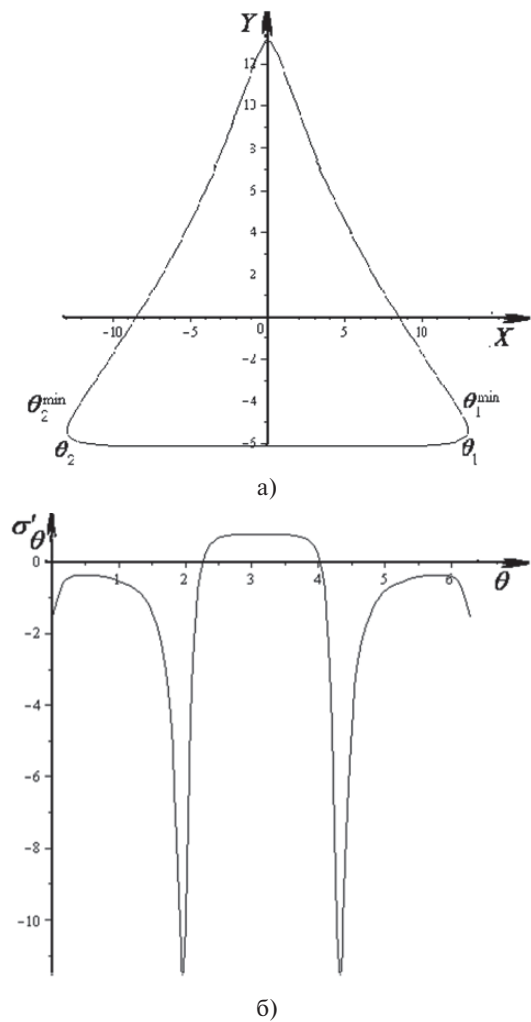


Рис. 4. Контур выработки треугольного сечения (а); эпюра тангенциального нормального напряжения (б)

Эти функции отображают внутренность единичного круга $|\zeta| < 1$ на плоскости с треугольным, кардиоидальным и круглым вырезом, изображенные на рис. 4–6.

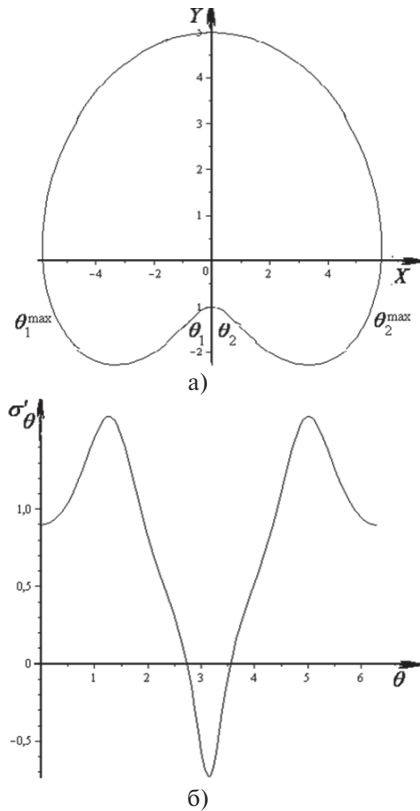


Рис. 5. Контур выработки кардиоидального сечения (а); эпюра тангенциального нормального напряжения (б)

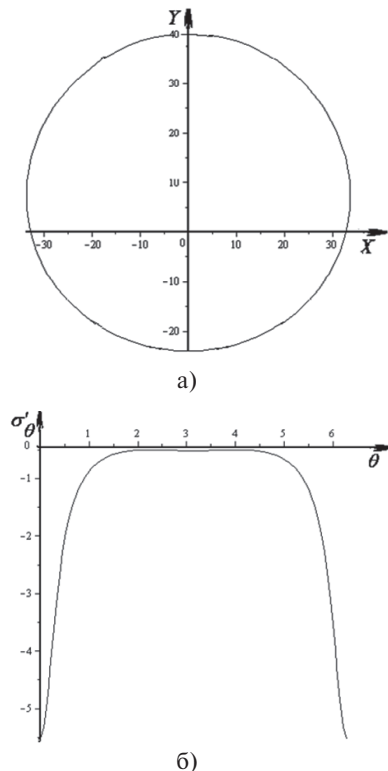


Рис. 6. Контур выработки сечением в виде окружности (а); эпюра тангенциального нормального напряжения (б)

Ясно, что приведенные выше примеры не исчерпывают всего разнообразия форм контуров подземных выработок, которые могут быть построены при использовании предлагаемой методики.

Мы стремились показать, что таким образом могут быть получены и «технологичные» контуры. Строя для таких контуров, расположенных на различных глубинах, эпюры напряжения σ_θ , и используя условие (3), можно определить безопасные (не требующие крепления) глубины заложения выработок различного сечения в разных вмещающих породах.

Заметим, что заданные априори и различные для каждого из рассмотренных примеров значения высот выработок h связаны с коэффициентом C отображающей функции (2). Понятно, что если необходимо изменить значение высоты выработки h в k раз, не изменяя ее формы, то для этого достаточно умножить коэффициенты отображающей функции на число k , т.е. рассмотреть отображающую функцию

$$z = \omega(\zeta) = ki(A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^2 + D\zeta^3). \quad (13)$$

Нетрудно видеть, что при этом будет получен вырез, гомотетичный исходному, с коэффициентом гомотетии k .

Для иллюстрации возможности использования, полученного нами решения и критерия (3) для отыскания предельной глубины заложения выработки, при которой не требуется ее укрепления, рассмотрим еще один пример.

Пример 4. На рис. 7 показаны зоны разрушения (или зоны необратимых деформаций по терминологии автора работы [4]) в выработке круглого поперечного сечения, приведенные в работе [4] (рис. 7, б), а также полученные нами (см. рис. 7, в, участки AB и CD). Зоны разрушения построены нами на основе анализа напряженно-состояния вмещающего массива на основе приведенного выше решения и критерия (3), аналогично тому, как это сделано в работах [5–10] при помощи компьютерной программы [11].

Из рис. 7 видно, что положение зон разрушения в обоих случаях практически совпадает. Асимметрия зон разрушения на рис. 7, б объясняется автором цитируемой работы тем, что «процесс деформирования гетерогенных структур даже в случае абсолютной симметрии внеш-

них воздействий (круглая выработка, осесимметричное нагружение, однородный вмещающий массив) уже несет в себе неоднородную компоненту, которая заключается в способности геологической среды, находится в различных фазах (состояниях)» [4].

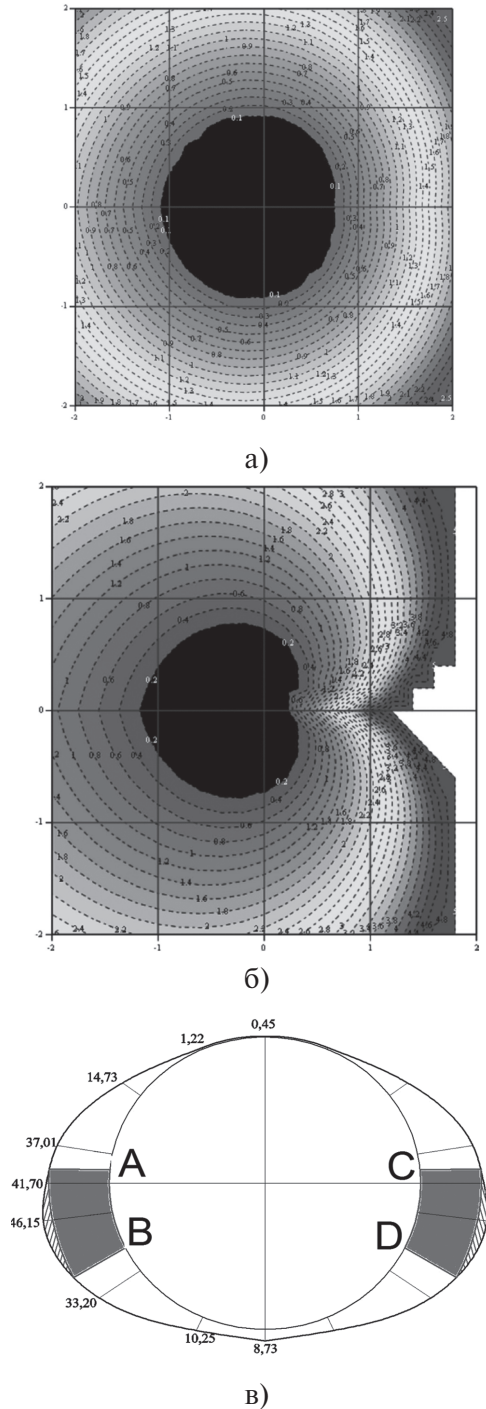


Рис. 7. Круглая выработка «за два шага до (а) и в момент потери устойчивости» (б) (цитируется по работе [3]) и участки AB и CD контура круглой выработки, где произошло ее разрушение согласно критерию (3)

Очевидно, что критерий (3) может быть использован и при определении напряженного состояния вмещающего массива и численными методами (МКЭ и МГЭ). В качестве примера определим зоны разрушения на контуре подземных выработок квадратного сечения со стороной $a = 5$ м. Будем полагать, что вмещающие массивы грунта сложены:

а) известняком с объемным весом $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$ и пределами прочности при сжатии и растяжении соответственно равными $R_c = 80 \text{ МПа}$ и $R_{\text{рас}} = 5 \text{ МПа}$;

б) глинистым сланцем с объемным весом $\gamma = 3,05 \text{ т/м}^3$ и пределами прочности при сжатии и растяжении соответственно равными $R_c = 40 \text{ МПа}$ и $R_{\text{рас}} = 1,0 \text{ МПа}$. Величина коэффициента бокового давления (распора) в обоих случаях принята равной $\xi_0 = 0,2$.

На рис. 8 и 9 изображены эпюры напряжения σ_θ , построенные по периметру горизонтальной выработки квадратного сечения, пройденной в известняке на глубинах 100 м, 900 м и 1000 м, а в глинистом сланце — на глубинах 100 м, 400 м и 500 м. На контурах выработок показаны участки периметра (ограничены красными нормальными к контуру), на которых не выполняется неравенство (1) и, следовательно, возникают зоны разрушения.

Напряженное состояние вмещающего массива, включая напряжения в контурных точках, определено при помощи компьютерной программы [12], в которой формализован, в том числе, и метод конечных элементов.

Из этих рисунков видно, что зоны разрушения в первом случае возникли только в потолочине выработки, а во втором, как в потолочине, и так и в нижних ее углах. Причем в менее прочном грунте (в нашем случае это глинистый сланец) при всех прочих равных условиях зоны разрушения образуются при меньшей глубине заложения выработки.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Использование отображающей функции (2) и приведенного в работе решения позволяет построить разнообразные по форме контуры вертикальных сечений горизонтальных подземных выработок и аналитическим путем определить численные значения напряжений в каждой точке построенных контуров.

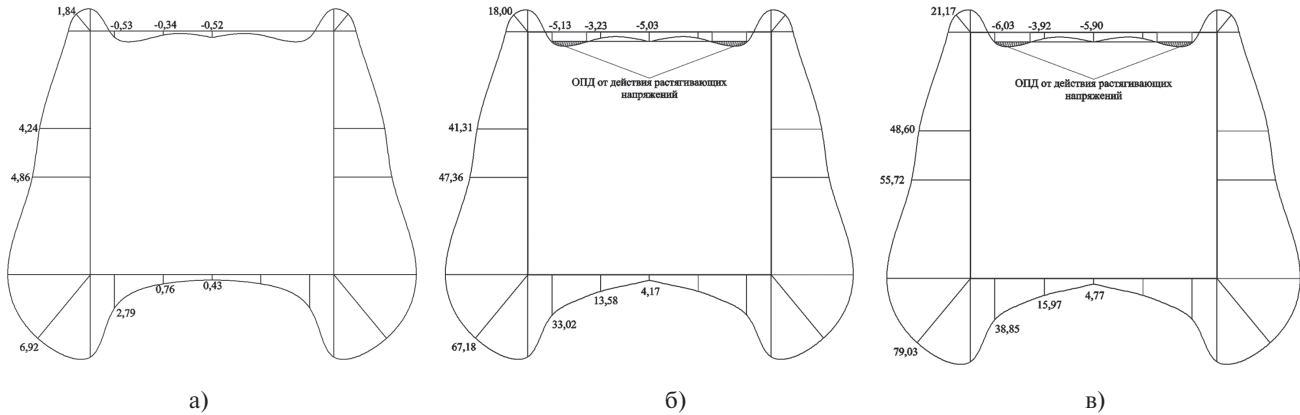


Рис. 8. Эпюры напряжения σ_θ , построенные по периметру горизонтальной выработки квадратного сечения, пройденной в известняке на глубинах $H = 100$ м, 900 м, 1000 м (а; б; в соответственно) и участки периметра (ограничены красными нормальными к контуру), на которых не выполняется неравенство (1) (ординаты эпюр действующего напряжения σ_θ показаны красным цветом)

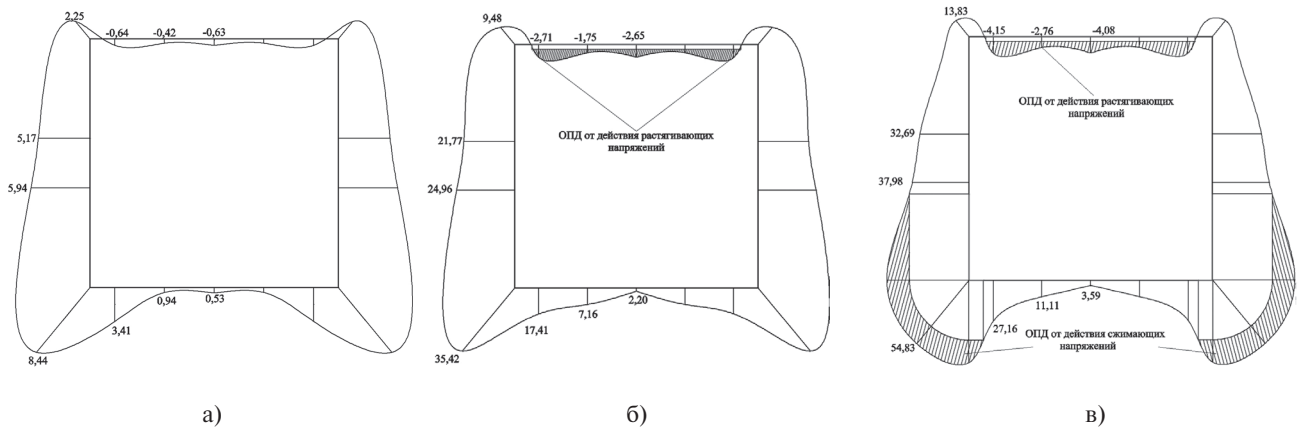


Рис. 9. Эпюры напряжения σ_θ , построенные по периметру горизонтальной выработки квадратного сечения, пройденной в сланце на глубинах 100 м, 400 м, 500 м (а; б; в соответственно) и участки периметра (ограничены красными нормальными к контуру), на которых не выполняется неравенство (1) (ординаты эпюр действующего напряжения σ_θ показаны красным цветом)

2. При помощи критерия (3) используя аналитические (приведенное выше решение) или численные (МКЭ) методы анализа напряженного состояния вмещающего массива можно определить предельную безопасную глубину заложения подземных выработок, исключая необходимость крепления последних.
3. Результаты проведенных нами вычислений удовлетворительно согласуются с результатами, полученными не зависимо от нас другими авторами, что позволяет рекомендовать предложенный подход для практического использования.

Литература

1. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н.И. Мухелишвили. — М.: Наука, 1966. — 606 с.
2. Цветков В.К. Определение форм сечения горных выработок с заданными напряжениями на их контурах [Текст] / В.К. Цветков // ФТПРПИ. — 1986. — № 2. — С. 24–29.
3. Цветков В.К. Расчет рациональных параметров горных выработок [Текст] / В.К. Цветков. — М.: Недра, 1993. — 251 с.
4. Дрибан В.А. Механизм формирования зоны необратимых деформаций вокруг выработок [Текст] / В.А. Дрибан / Проблемы гірського тиску: зб. наук. пр. // Донец. нац. техн. ун-т. — 2010. — № 18. — С. 73–93.

5. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругоупругопластической постановке [Текст] / А.Н. Богомолов. — Пермь: ПГТУ, 1996. — 150 с.
6. Богомолов А.Н. Методы теории функций комплексного переменного в задачах геомеханики [Текст] / А.Н. Богомолов, А.Н. Ушаков. — Волгоград: Перемена, 2014. — 227 с.
7. Евтушенко С.И. Современные методы расчета фундаментов [Текст]: монография / С.И. Евтушенко, А.Н. Богомолов, А.Н. Ушаков, С.И. Шиян. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2011. — 238 с.
8. Богомолов А.Н. Анализ напряженного состояния грунтового массива, вмещающего подземные пространства различной конфигурации [Текст] / А.Н. Богомолов [и др.] // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия «Строит. Информатика». — 2012. — Вып. 8. — URL: www.vestnik.vgasu.ru
9. Богомолов А.Н. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения [Текст] / А.Н. Богомолов [и др.] // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия «Полиэкономическая». — 2013. — Вып. 2. — URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf)
10. Богомолов А.Н. Пример определения безопасной глубины заложения горизонтальной выработки сложного сечения [Текст] / А.Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волггр. гос. архит.-строит. ун-та. Серия «Строительство и архитектура». — 2013. — Вып. 33. — С. 6–12.
11. Богомолов А.Н. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009613499 [Текст] / А.Н. Богомолов [и др.]. — № 2009612297; заявл. 19.05.2009; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. — 1 с.

References

1. Muskhelishvili N.I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* [Some basic tasks of the mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 606 p.
2. Svetkov V.K. Opredelenie form secheniya gornyh vyrabotok s zadannymi napryazheniyami na ih konturah [Determination of cross-sectional shapes of mine workings with predetermined stresses on their contours]. *FTPRPI* [FTPRPI]. 1986, I. 2, pp. 24–29.
3. Svetkov V.K. *Raschet racional'nyh parametrov gornyh vyrabotok* [Calculation of rational parameters of mine workings]. Moscow: Nedra Publ., 1993. 251 p.
4. Driban V.A. Mekhanizm formirovaniya zony neobratimyh deformacij vokrug vyrabotok [The mechanism of the formation of the zone of irreversible deformations around the workings]. *Problemi girs'kogo tisku: Doneckij nacional'nyj tekhnicheskij univresitet* [Problems of the girs'ky vice: Donetsk National Technical University]. 2010, I. 18, pp. 73–93.
5. Bogomolov A.N. *Raschet nesushchej sposobnosti osnovaniy sooruzhenij i ustojchivosti gruntovyh massivov v uprugoplasticheskoy postanovke* [Calculation of the bearing capacity of the foundations of structures and the stability of soil masses in an elastoplastic setting]. Perm': PGU Publ., 1996. 150 p.
6. Bogomolov A.N., Ushakov A.N. *Metody teorii funktsij kompleksnogo peremennogo v zadachah geomekhaniki* [Methods of the theory of functions of a complex variable in problems of geomechanics]. Volgograd: Peremena Publ., 2014. 227 p.
7. *Sovremennye metody rascheta fundamentov* [Modern methods of calculating the foundations]. Novocherkassk: YuRGU (NPI) Publ., 2011. 238 p.
8. Bogomolov A.N. Analiz napryazhennogo sostoyaniya gruntovogo massiva, vmeshchayushchego podzemnye prostranstva razlichnoj konfiguracii [Analysis of the stress state of a soil massif containing underground spaces of various configurations]. *Internet-vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i informatika* [Internet bulletin of VolgGASU. Series: Construction and Computer Science]. 2012, I. 8. Available at: www.vestnik.vgasu.ru
9. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Shubin M.A., Pavlov D.V., Podlinev M.V., Solov'ev A.V. Opredelenie predel'noj glubiny zalozheniya gorizonta'lyh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniya [Determination of the maximum laying depth of horizontal workings of various cross-sections]. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politicheskaya* [Internet Bulletin of VolgGASU. Series: Political]. 2013, I. 2. Available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf)
10. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Shelud'ko S.L., Solov'ev A.V. Primer opredeleniya bezopasnoj glubiny zalozheniya gorizonta'lyh vyrabotki slozhnogo secheniya [An example of determining the safe depth of the horizontal development of a complex section]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2013, I. 33, pp. 6–12.
11. Bogomolov A.N. *Ustojchivost' (Napryazhenno-deformirovanoe sostoyanie): svidetel'stvo o gos. registracii programm dlya EVM № 2009613499* [Sustainability (stress-strain state): certificate of state. registration of computer programs No. 2009613499]. 1 p.