



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.01

УДК 624.131.522

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ОСАДКИ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

О.А. Богомолова¹, А.В. Жиделев²

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

²Филиал «Взлет» Московского авиационного института

(национального исследовательского университета) в г. Ахтубинске, Ахтубинск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 декабря 2019

Принята: 03 марта 2020

Опубликована: 30 июня 2020

Ключевые слова:

подрабатываемая территория, подземная выработка, форма и размеры поперечного сечения, глубина заложения выработки, осадка дневной поверхности подрабатываемой территории, коэффициент бокового давления грунта вмещающего массива.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты анализа влияния на осадки дневной поверхности подрабатываемой территории формы поперечного сечения, глубины заложения и поперечных размеров подземной выработки при разных численных значениях коэффициента бокового давления вмещающего грунта.

Численное решение выполнено в упругой постановке при помощи компьютерных программ FEA и «Устойчивость». При проведении вычислений величина модуля упругости вмещающих пород принята равной безразмерной константе $E/\gamma H = 500$ (γ ; H – объемный вес пород и глубина заложения выработок), поэтому численные значения вертикальных смещений в результате вычислений получаются также безразмерными. Это удобно как для количественного, так и для качественного анализа, так как рассматриваются не только конкретные значения вертикальных смещений, но и закономерности изменения их величин в зависимости от изменения численных значений переменных расчетных параметров. Учитывая, что перемещения при линейной постановке задачи обратно пропорциональны величине модуля упругости, можно определить их величины при любом другом значении E .

Установлено, что вертикальные перемещения точек земной поверхности, находящихся над выработкой, при условии, что глубина ее заложения более 15,2 м, а размеры поперечного больше, чем 4×4 м, существенным образом зависят от формы поперечного сечения и коэффициента бокового давления вмещающего грунта. При этом меньшие по величине вертикальные осадки дневной поверхности соответствуют подземной выработке, имеющей экзотическое и «не технологичное» поперечное сечение в виде дельтоиды. Поэтому возникает задача нахождения такой оптимальной формы поперечного сечения выработки, которая обеспечивала бы минимальные по величине осадки земной поверхности. Форма поперечного сечения выработки должна быть максимально «технологичной» с точки зрения ее проходки. Решение этих задач будет составлять предмет дальнейших исследований.

© ПНИПУ

© Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, OrcidID 0000-0003-1163-6285, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.

Жиделев Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, OrcidID: 0000-0003-1763-3675, e-mail: red_scorpion@list.ru.

Оксана А. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, OrcidID: 0000-0003-1163-6285, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.

Andrey V. Zhidelev – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, OrcidID: 0000-0003-1763-3675, e-mail: red_scorpion@list.ru.

INFLUENCE OF UNDERGROUND MINE PARAMETERS ON THE VALUE OF DAYLIGHT SURFACE SETTLEMENT OF UNDERMINED TERRITORY

O.A. Bogomolova¹, A.V. Zhidelev²

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

²Branch of Moscow Aviation Institute (National Research University) "Vzlet", Akhtubinsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 December 2019
Accepted: 03 March 2019
Published: 30 June 2020

Keywords:

undermined territory, underground mine, shape and dimensions of cross-section, mine laying depth, daylight surface settlement of undermined territory, soil lateral pressure coefficient of the enclosing massive.

ABSTRACT

The article presents the analysis results of influence of shape and dimensions of cross-section, laying depth of mine, cross-section shape and dimensions of underground mine on the daylight surface settlement of undermined territory depending on the different numerical values of the soil lateral pressure coefficient of the surrounding soil.

The numerical solution was obtained in an elastic setting using the computer programs «FEA» and «Stability». In the calculations, the elastic modulus of the enclosing rocks is taken equal to the dimensionless constant $E/\gamma H = 500$ (where γ ; H are the rocks volumetric weight and laying depth of mine), therefore, the numerical values of the vertical displacements gained as a result of the calculations are also dimensionless. This approach is convenient for both quantitative and qualitative analysis, because not only specific values of vertical displacements are considered, but also change patterns of their values depending on changes in the numerical values of the variables of the calculated parameters. Assuming that the displacements in the linear formulation of the problem are inversely proportional to the elastic modulus, their magnitudes can be determined for any other value of E .

It was established the vertical displacements of earth's surface points located above the mine, provided that the depth of its laying is more than 15.2 m and the dimensions of the cross section are greater than 4×4 m, significantly depend on the shape of the cross section and the lateral pressure coefficient of the surrounding rock. In addition, smaller vertical precipitation of the daylight surface corresponds to an underground mine having an exotic and «non-technological» cross section in the deltoid form. Therefore, the problem arises is to obtain such an optimal cross-sectional shape of the mine that would ensure the minimum precipitation of the earth's surface. The cross-sectional shape of the mine must be as «technological» as possible according to its advancement. The subject of further research is the solution of these problems.

© PNRPU

Введение

В работе [1] приведена часть результатов численного моделирования процесса оседания земной поверхности, расположенной над горизонтальными подземными выработками, формы поперечного сечения которых представляют собой квадрат и половину эллипса.

Установлено, что если вмещающий массив однороден и изотропен, то величина максимального перемещения точки земной поверхности, расположенной на оси симметрии выработки, зависит от величины коэффициента бокового давления грунта, глубины заложения выработки H , размеров и формы ее поперечного сечения. Причем при всех прочих равных условиях перемещение этой точки земной поверхности, расположенной над полуэллиптической выработкой, всегда значительно меньше, чем в случае, когда форма поперечного сечения представляет собой квадрат.

Показано, что мульда оседания для всех рассмотренных вариантов расчета имеет седлообразную форму (рис. 1), что согласуется с результатами исследований других авторов и натуральных наблюдений [2–12].

При увеличении коэффициента бокового давления вмещающего грунта (породы) ξ_0 и глубины заложения выработки (при неизменных других условиях) величины вертикальных

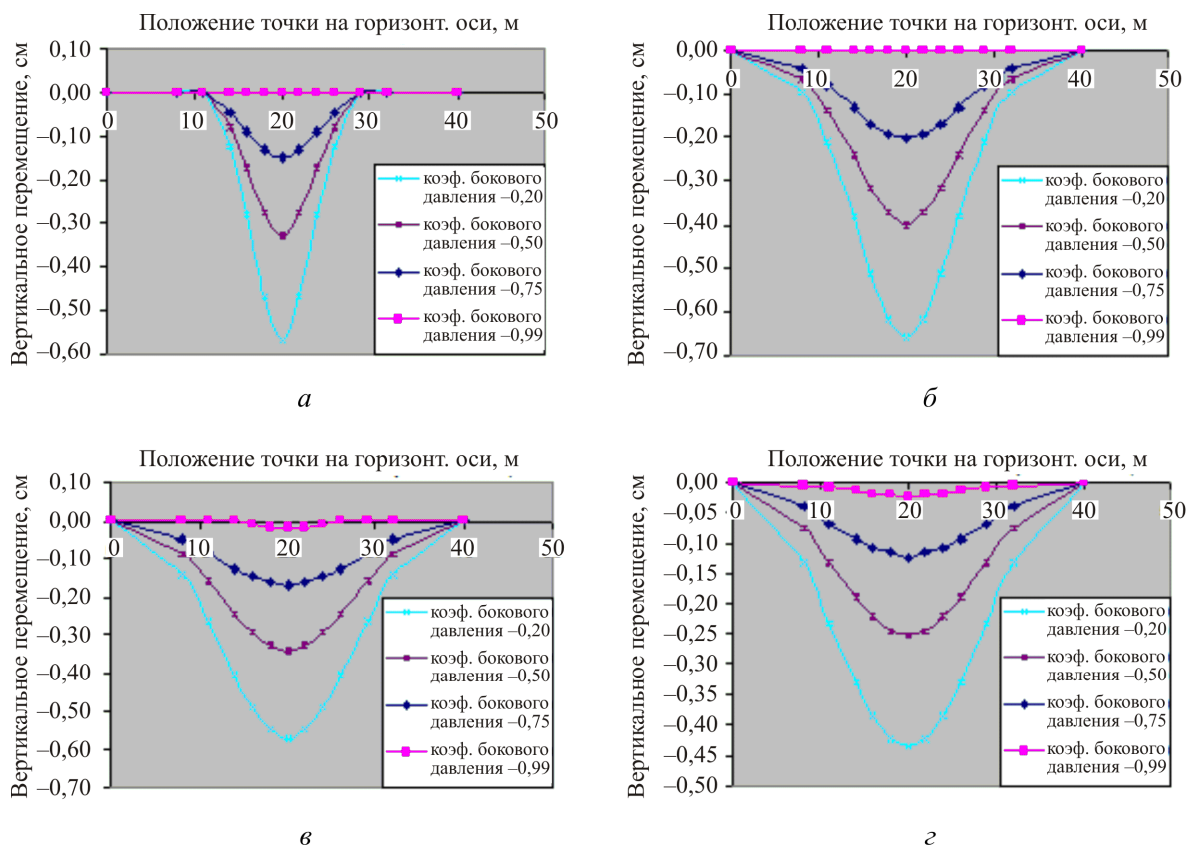


Рис. 1. Графики оседания земной поверхности над подземной выработкой (полуэллипс размером 4×4 м), отработанной на глубине: а – 5,2 м; б – 10,0 м; в – 15,2 м и г – 20 м, при численных значениях $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$

Fig. 1. Graphs of earth's surface subsidence above the underground mine (semi-ellipse 4×4 m in size) worked out at a depth 5,2 m (a); 10,0 m (b); 15,2 m (c) и 20 m (d) at various numerical values $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$

смещений точек дневной поверхности уменьшаются. Увеличение геометрических размеров поперечного сечения выработки, напротив, во всех случаях ведет к увеличению численных значений вертикальных смещений.

Численное решение выполнено в упругой постановке при помощи компьютерных программ [13, 14]. При проведении вычислений величина модуля упругости вмещающих пород принята равной безразмерной константе $\frac{E}{\gamma H} = 500$ ($\gamma; H$ – объемный вес пород

и глубина заложения выработок), поэтому численные значения вертикальных смещений в результате вычислений получаются также безразмерными. Это удобно как для количественного, так и для качественного анализа, поскольку интересны не только конкретные значения вертикальных смещений, но и закономерности изменения их величин в зависимости от изменения численных значений переменных расчетных параметров. В качестве таких параметров выступают форма и размеры поперечного сечения выработки, глубина ее заложения и коэффициент бокового давления вмещающих пород. Учитывая, что перемещения при линейной постановке задачи обратно пропорциональны величине модуля упругости, можно определить их величины при любом другом значении E .

Основная часть

Задачей исследования, результаты которого излагаются ниже, было установить особенности изменения величин вертикальных перемещений точек земной поверхности, расположенных на оси симметрии выработки, при условии, что сечения выработок имеют форму квадрата, половины эллипса, окружности и дельтоиды в зависимости от их геометрических размеров, глубины заложения и величины коэффициента бокового давления вмещающего массива. Принято, что поперечные размеры выработок (стороны квадрата, в который вписаны соответствующие геометрические фигуры (рис. 2)) имеют значения 2,4×2,4 м; 4,0×4,0 м; 8,0×8,0 м, глубина заложения выработок $H = 5,2$ м; 10,0 м; 15,2 м и 20 м, а величина коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$.

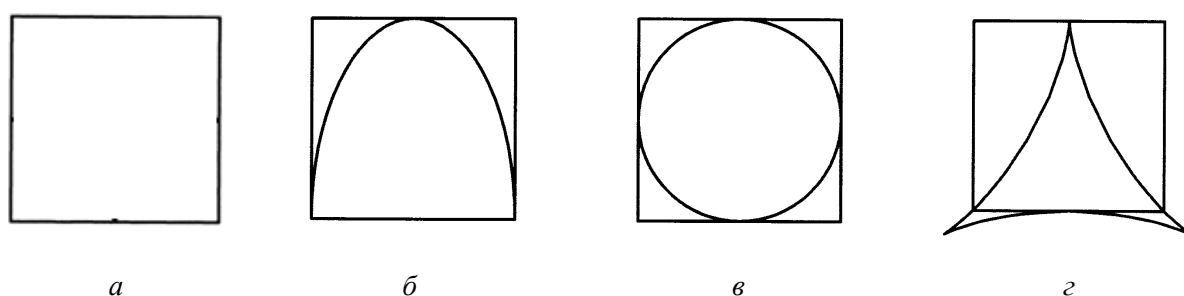


Рис. 2. Формы поперечного сечения подземной выработки: *a* – квадрат; *б* – половина эллипса, вписанная в квадрат; *в* – окружность, вписанная в квадрат; *г* – дельтоида

Fig. 2. Forms of the cross section of the underground mine: square (*a*); half of the ellipse inscribed in square (*b*); circle inscribed in square (*c*); deltoid (*d*)

Как видно из рис. 2, поперечные размеры дельтоиды несколько больше поперечных размеров остальных фигур. Будем считать, что при расчете это идет в запас.

На рис. 3–5 приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(H)$, которые показывают, как изменяются величины вертикального смещения точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработок с сечением в виде квадрата, половины эллипса, окружности и дельтоиды, по мере увеличения глубины их заложения.

Качественный анализ кривых показывает, что для выработок с любой из рассмотренных форм поперечного сечения, при значениях коэффициента бокового давления грунта $\xi_0 \geq 0,75$, они вогнуты вниз, на всех кривых имеется локальный максимум, который соответствует глубине заложения выработок $H \approx 10$ м.

При $\xi_0 = 0,99$ знак кривизны меняется на противоположный, кривые становятся выпуклыми, за исключением уже оговоренных и кривых, построенных для выработок, расположенных на глубине 20 м, которые имеют размеры поперечного сечения 8×8 м. Исключение составляют только кривые, построенные для выработок квадратного сечения с поперечными размерами 4×4 м при коэффициенте бокового давления вмещающего грунта $\xi_0 \leq 0,75$ и с поперечными размерами 8×8 м при всех рассмотренных численных значениях этого коэффициента. Эти кривые с достаточной для практики степенью точности аппроксимируются прямыми линиями.

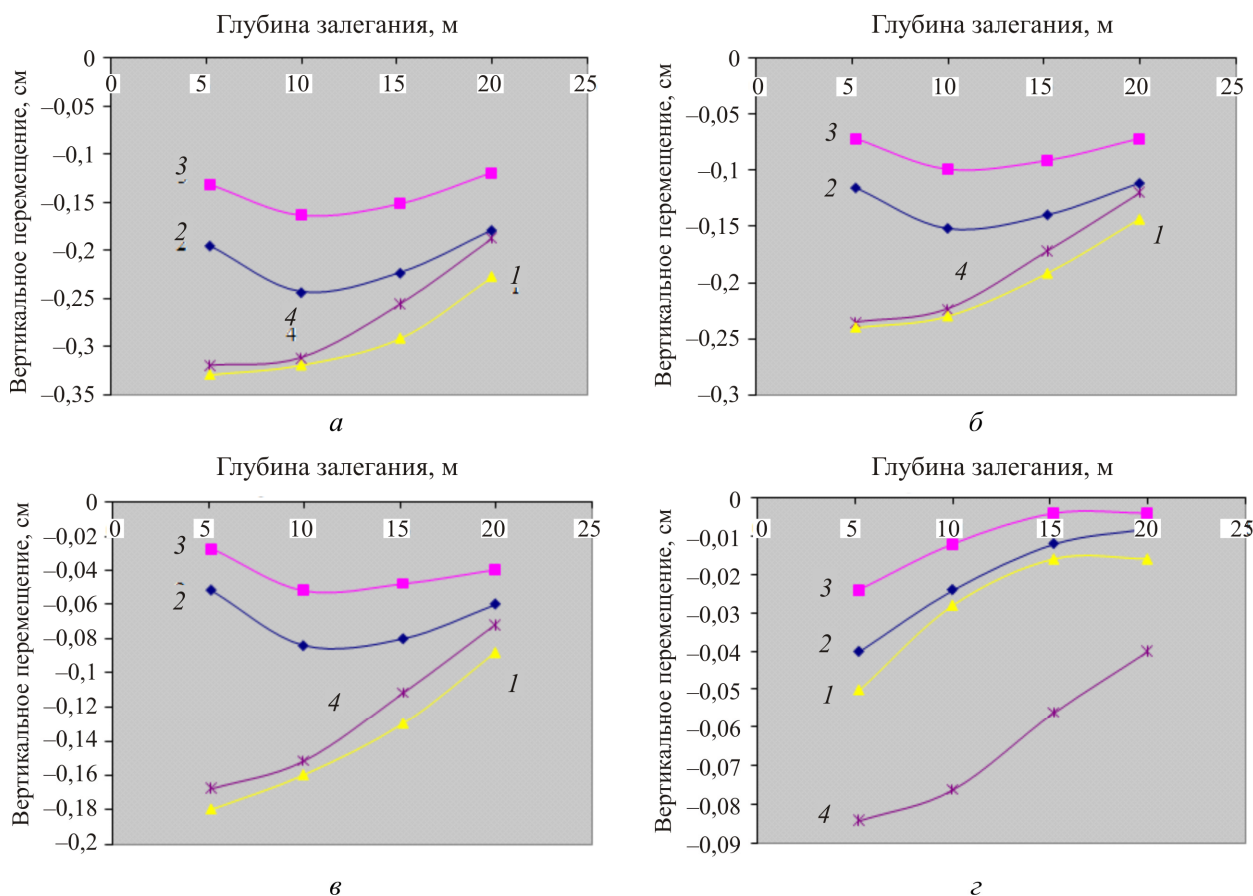


Рис. 3. Кривые $\delta = f(H)$ зависимости величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии, что их поперечные размеры $2,4 \times 2,4$ м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$ – а; б; в; г соответственно

Fig. 3. Curves $\delta = f(H)$ of the dependence of the vertical displacement magnitude of a earth's surface point lying on the symmetry axis of the mine having a cross section in the form of a square (1), circle (2), half an ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions are 2.4×2.4 m, and the value of the lateral pressure coefficient of the surrounding rock gains the values $\xi_0 = 0.2; 0.5; 0.75; 0.99$ – a; b; c; d respectively

На рис. 6–9 приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$, построенные для выработок, имеющих те же характеристики. Из этих рисунков хорошо видно, что полученные кривые близки к прямым линиям, т.е. величины вертикального смещения точек, расположенных на пересечении осей симметрии выработок и линии дневной поверхности, практически линейно зависят от величины коэффициента бокового давления (распора) вмещающего грунта.

Следует отметить, что при численном значении коэффициента бокового давления вмещающего грунта, близком по величине единице ($\xi_0 = 0,99$), величины вертикальных смещений этих точек, расположенных над выработками квадратной, круглой и полуэллиптической формы, стремятся вне зависимости от глубины заложения выработки к пределу, который для каждой формы поперечного сечения выработки имеет свое численное значение. Однако этого нельзя сказать в том случае, когда поперечное сечение подземной выработки имеет форму дельтоиды (см. рис. 6).

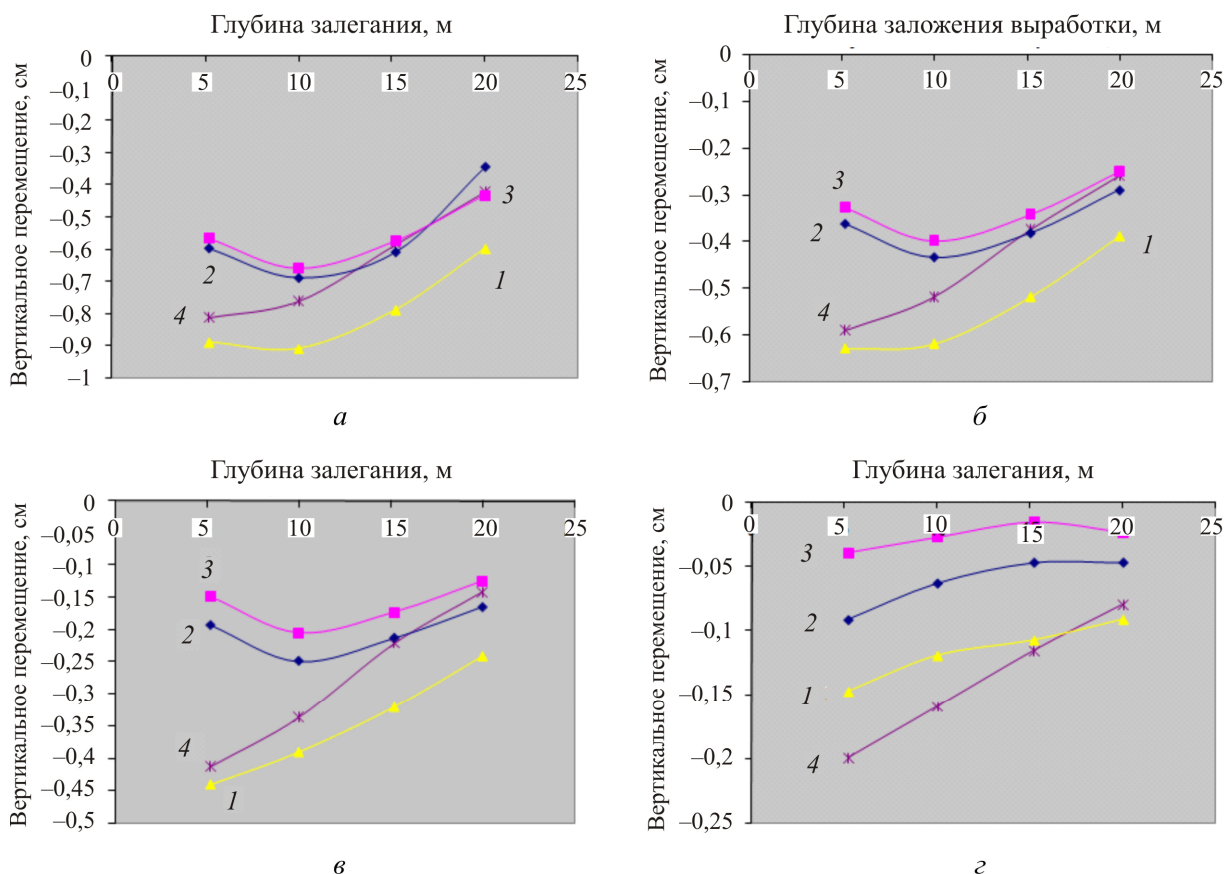


Рис. 4. Кривые $\delta = f(H)$ зависимости величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии, что их поперечные размеры 4×4 м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$ – а; б; в; з соответственно

Fig. 4. Curves $\delta = f(H)$ of the dependence of the vertical displacement magnitude of a earth's surface point lying on the symmetry axis of the mine having a cross section in the form of a square (1), circle (2), half an ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions are 4×4 m, and the value of the lateral pressure coefficient of the surrounding rock gains the values $\xi_0 = 0.2; 0.5; 0.75; 0.99$ – a; b; c; d respectively

Для удобства количественного анализа влияния переменных расчетных параметров составлена таблица, в которой приведены безразмерные численные значения вертикальных смещений точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки, которые вычислены для всех рассмотренных в работе вариантов.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что численные значения вертикальных смещений рассматриваемых точек зависят от поперечных размеров выработки, формы ее поперечного сечения, глубины заложения и коэффициента бокового давления. Если рассматривать выработки, у которых размеры поперечного сечения не превышают 4×4 м, то окажется, что при всех прочих равных условиях наибольшие перемещения соответствуют выработке с формой поперечного сечения в виде дельтоиды.

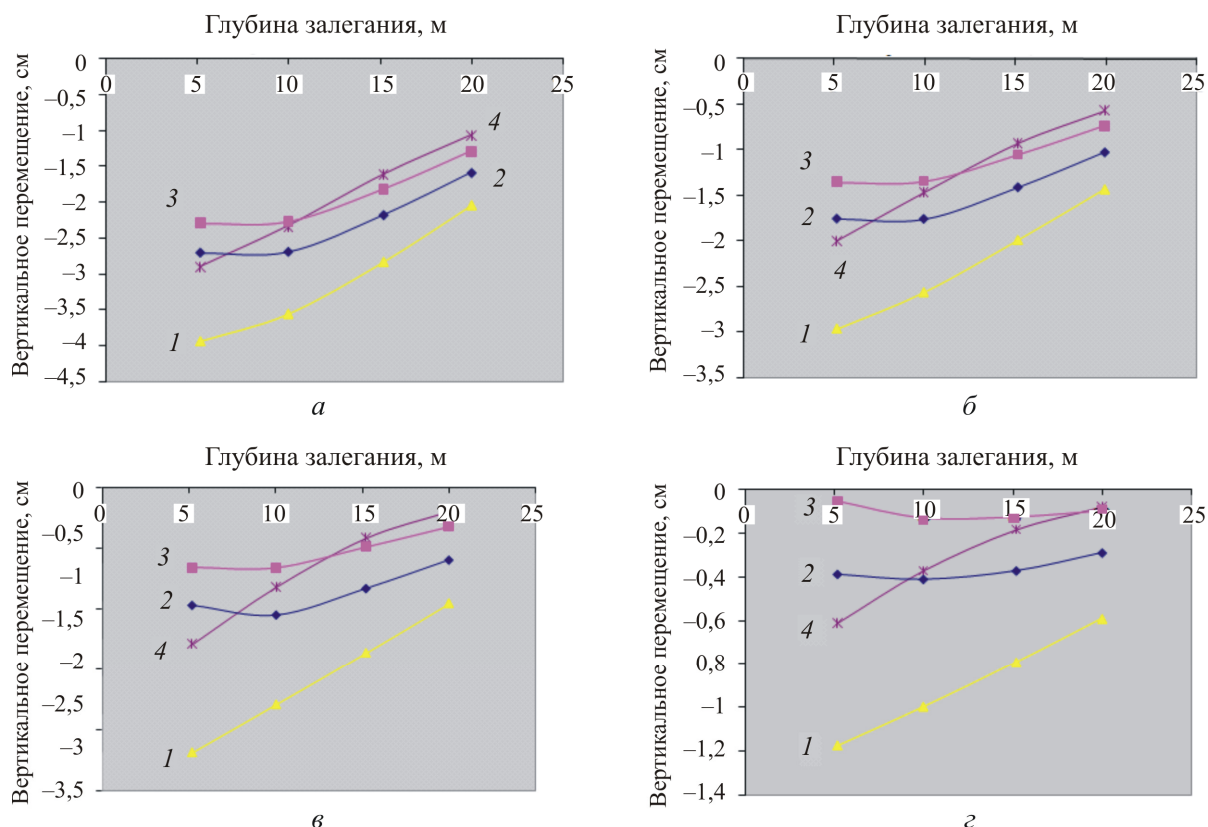


Рис. 5. Кривые вида $\delta = f(H)$ зависимости величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии, что их поперечные размеры 8×8 м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$ – а; б; в; г соответственно

Fig. 5. Curves $\delta = f(H)$ of the dependence of the vertical displacement magnitude of a earth's surface point lying on the symmetry axis of the mine having a cross section in the form of a square (1), circle (2), half an ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions are 8×8 m, and the value of the lateral pressure coefficient of the surrounding rock gains the values $\xi_0 = 0.2; 0.5; 0.75; 0.99$ – a; b; c; d respectively

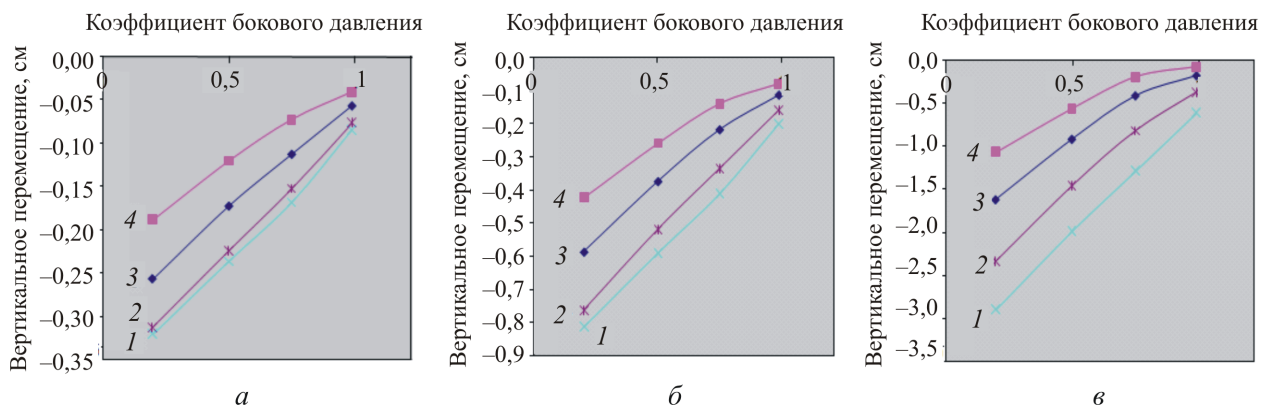


Рис. 6. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде дельтоиды, с поперечными размерами 2,4 м (а); 4 м (б); 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 м (1); 10 м (2); 15,2 м (3) и 20 м (4)

Fig. 6. Dependence curves of the form $\delta = f(\xi_0)$ for mines having a deltoid contour, with cross dimensions of 2.4 m (a); 4 m (б); 8 m (в), located at a depth of 5.2 m (1); 10 m (2); 15.2 m (3) and 20 m (4)

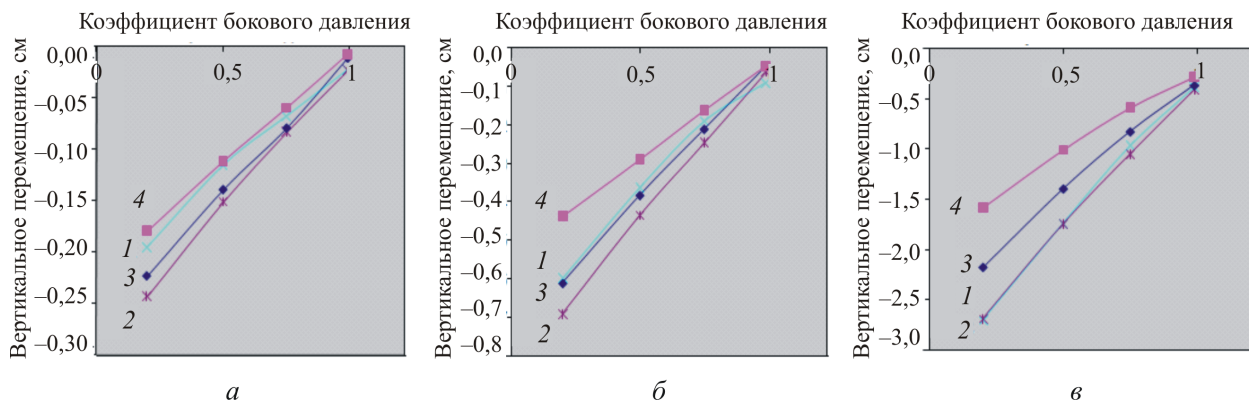


Рис. 7. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде окружности, с поперечными размерами 2,4 м (а); 4 м (б); 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 м (1); 10 м (2); 15,2 м (3) и 20 м (4)

Fig. 7. Dependence curves of the form $\delta = f(\xi_0)$ for mines having a circle contour, with cross dimensions of 2.4 m (a); 4 m (b); 8 m (c), located at a depth of 5.2 m (1); 10 m (2); 15.2 m (3) and 20 m (4)

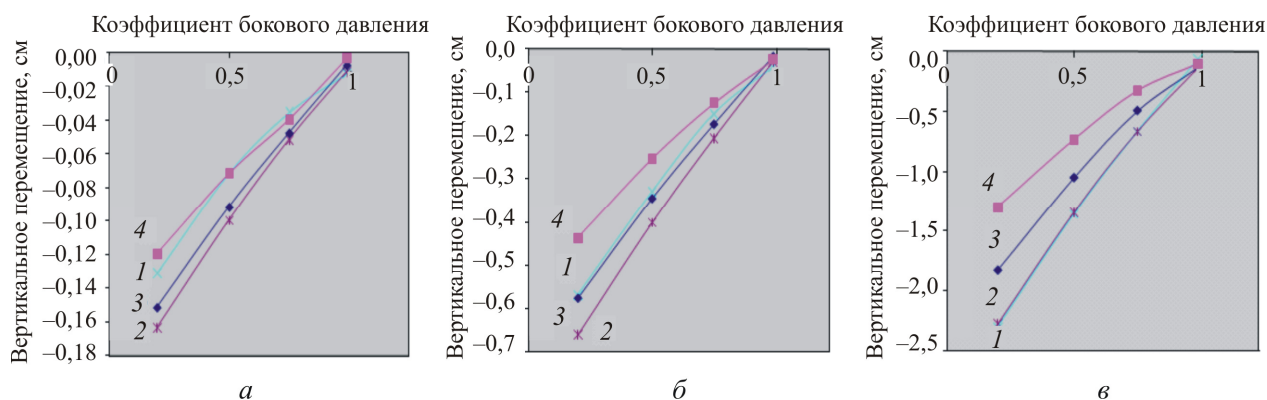


Рис. 8. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде половины эллипса, с поперечными размерами 2,4 м (а); 4 м (б); 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 м (1); 10 м (2); 15,2 м (3) и 20 м (4)

Fig. 8. Dependence curves of the form $\delta = f(\xi_0)$ for mines having a half-ellipse contour, with cross dimensions of 2.4 m (a); 4 m (b); 8 m (c), located at a depth of 5.2 m (1); 10 m (2); 15.2 m (3) and 20 m (4)

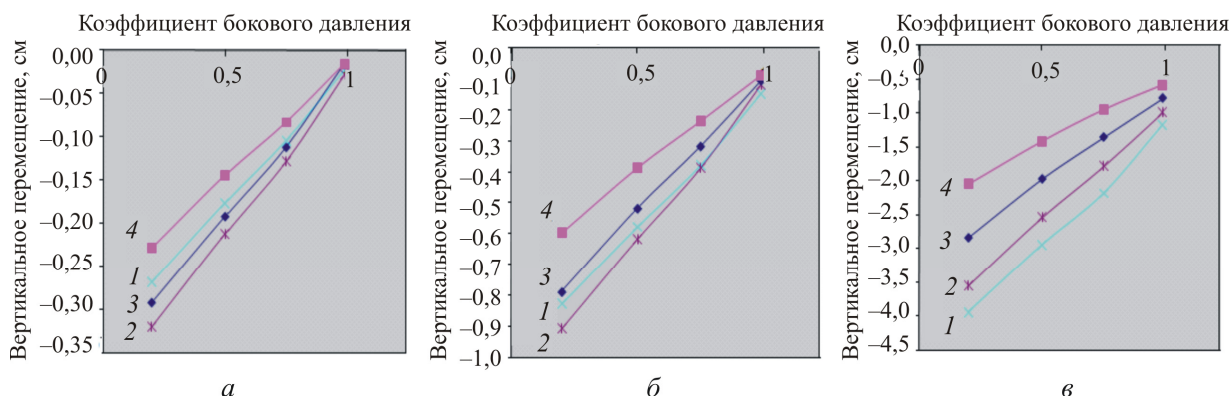


Рис. 9. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде квадрата, с поперечными размерами 2,4 м (а); 4 м (б); 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 м (1); 10 м (2); 15,2 м (3) и 20 м (4)

Fig. 9. Dependence curves of the form $\delta = f(\xi_0)$ for mines having a square contour, with cross dimensions of 2.4 m (a); 4 m (b); 8 m (c), located at a depth of 5.2 m (1); 10 m (2); 15.2 m (3) and 20 m (4)

Вертикальные смещения точек земной поверхности, лежащих на оси симметрии выработки
 Vertical displacements of earth's surface points lying on the symmetry axis of the mine

ξ_0	Форма и размер поперечного сечения											
	Полу-эллипс, 2,4×2,4 м	Квадрат, 2,4×2,4 м	Круг, 2,4×2,4 м	Дельтоида, 2,4×2,4 м	Полу-эллипс, 4×4 м	Квадрат, 4×4 м	Круг, 4×4 м	Дельтоида, 4×4 м	Полу-эллипс, 8×8 м	Квадрат, 8×8 м	Круг, 8×8 м	Дельтоида, 8×8 м
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 5,2 м												
0,2	-0,1320	-0,2680	-0,1960	-0,3200	-0,5680	-0,8300	-0,6000	-0,8160	-2,3000	-3,9480	-2,7080	-2,9080
0,5	-0,0720	-0,1760	-0,1160	-0,2360	-0,3280	-0,5800	-0,3640	-0,5920	-1,3520	-2,9520	-1,7480	-1,9920
0,75	-0,0280	-0,1040	-0,0520	-0,1680	-0,1480	-0,3800	-0,1920	-0,4120	-0,6600	-2,1880	-0,9760	-1,2920
0,99	0,0012	0,029	0,022	-0,0840	0,0012	-0,0500	0,0440	-0,2000	-0,0160	-1,1520	-0,3080	-0,6160
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 10 м												
0,2	-0,1640	-0,3200	-0,2440	-0,3120	-0,6600	-0,9100	-0,6920	-0,7640	-2,2760	-3,5680	-2,6960	-2,3400
0,5	-0,1000	-0,2120	-0,1520	-0,2240	-0,4000	-0,6200	-0,4360	-0,5200	-1,3400	-2,5520	-1,7520	-1,4640
0,75	-0,0520	-0,1280	-0,0840	-0,1520	-0,2040	-0,3900	-0,2480	-0,3360	-0,6640	-1,7960	-1,0560	-0,8240
0,99	0,0008	0,0022	0,0019	-0,0760	0,0000	-0,1100	-0,0320	-0,1600	-0,1320	-1,0000	-0,4160	-0,3760
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 15,2 м												
0,2	-0,1520	-0,2920	-0,2240	-0,2560	-0,5760	-0,7900	-0,6120	-0,5880	-1,8240	-2,8440	-2,1840	-1,6240
0,5	-0,0920	-0,1920	-0,1400	-0,1720	-0,3440	-0,5200	-0,3840	-0,3760	-1,0480	-1,9800	-1,4040	-0,9240
0,75	-0,0480	-0,1120	-0,0800	-0,1120	-0,1720	-0,3200	-0,2120	-0,2200	-0,4920	-1,3680	-0,8360	-0,4200
0,99	0,0017	-0,0120	-0,0040	-0,0560	-0,0160	-0,1100	-0,0480	-0,1160	-0,1280	-0,7960	-0,3760	-0,1880
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 20 м												
0,2	-0,1200	-0,2280	-0,1800	-0,1880	-0,4360	-0,6000	-0,3480	-0,4240	-1,2960	-2,0560	-1,5960	-1,0760
0,5	-0,0720	-0,1440	-0,1120	-0,1200	-0,2520	-0,3900	-0,2920	-0,2600	-0,7320	-1,4240	-1,0200	-0,5680
0,75	-0,0400	-0,0880	-0,0600	-0,0720	-0,1240	-0,2400	-0,1640	-0,1400	-0,3240	-0,9600	-0,6000	-0,2000
0,99	-0,0040	-0,0160	-0,0080	-0,0400	-0,0240	-0,0900	-0,0480	-0,0800	-0,25000	-0,5960	-0,2920	-0,0840

Далее в порядке уменьшения величин перемещений следуют выработки, имеющие форму поперечного сечения в виде квадрата, круга и половины эллипса. Причем численные значения перемещений в зависимости от формы выработки отличаются друг от друга незначительно.

Сказанное выше наглядно иллюстрируется графическими зависимостями вида $|\delta| = f(H; \xi_0)$, которые построены на основе данных, приведенных в таблице, и приведены на рис. 10.

Аналогичный вывод сделан автором работы [14], где сказано, «что форма контура незначительно влияет на величину сдвига, так что при расчете контур в большинстве случаев можно заменить прямоугольником такой же высоты» (конец цитаты).

Если поперечный размер выработок составляет 8×8 м, а глубина заложения равна 15,2 м и более, то картина меняется. Если для этих условий ранжировать форму выработок в порядке увеличения вертикальных перемещений рассматриваемых точек, то минимальные перемещения будут соответствовать выработке, имеющей поперечное сечение в виде дельтоиды, затем следуют выработки с поперечным сечением в виде половины эллипса, круга и квадрата. Например, если рассмотреть выработки с поперечным размером 8×8 м, расположенные на глубине 20 м, при условии, что коэффициент бокового давления вмещающих пород $\xi_0 = 0,2$, то окажется, что вертикальные перемещения рассматриваемых точек дневной поверхности, расположенные над выработками с сечением в виде половины эллипса, круга и квадрата, соответственно в 1,2; 1,48 и 1,9 раза больше, чем точек, расположенных над выработкой, сечение которой имеет форму дельтоиды. Если коэффициент бокового давления $\xi_0 = 0,99$, то разница перемещений составляет почти 3; 4 и 7 раз соответственно.

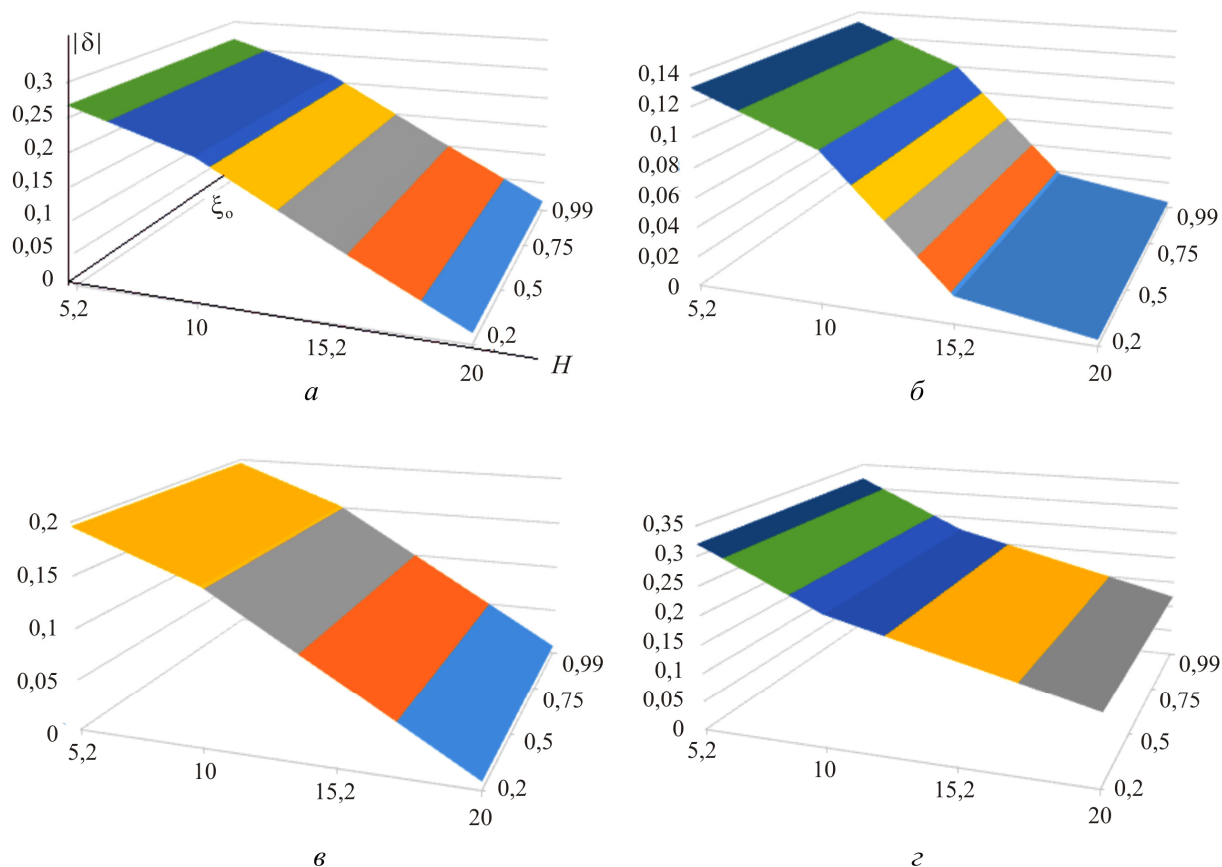


Рис. 10. Поверхности вида $|\delta| = f(H; \xi_0)$ для подземной выработки с сечением в виде: *a* – квадрата; *б* – половины эллипса; *в* – окружности; *г* – дельтоиды, при поперечном размере выработок 4×4 м
 Fig. 10. Surfaces of the form $|\delta| = f(H; \xi_0)$ for an underground mine with a section in the form of a square (*a*), half an ellipse (*b*), circle (*c*) and deltoids (*d*) with transverse dimensions of mine 4×4 m

Все перечисленные факты объясняются тем, что в окрестностях подземных выработок различной формы, но при всех остальных равных условиях возникают поля напряжений, кардинально отличающиеся друг от друга своими параметрами. На рис. 11 для иллюстрации этого утверждения приведены картины безразмерных (в долях γH) изолиний вертикальных σ_z , горизонтальных σ_x и касательных τ_{xz} напряжений в окрестности подземных выработок, расположенных на одинаковой глубине, при величине коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,2$ для выработок с поперечным сечением в виде астроида и квадрата.

Известны решения задачи об определении формы поперечного сечения подземной выработки, которая при всех прочих равных условиях обеспечивает максимальную устойчивость последней (рациональная форма). Так, например, в работах проф. В.К. Цветкова [15–18] показано, что каждому значению величины коэффициента бокового давления вмещающего грунта (горной породы) соответствует своя, ему только присущая, рациональная (с точки зрения устойчивости) форма поперечного сечения подземной выработки. И это понятно. Форма сечения подземной выработки, как видно из рис. 11, определяет напряженное состояние массива, которое, в свою очередь, влияет на устойчивость самой выработки [19–22].

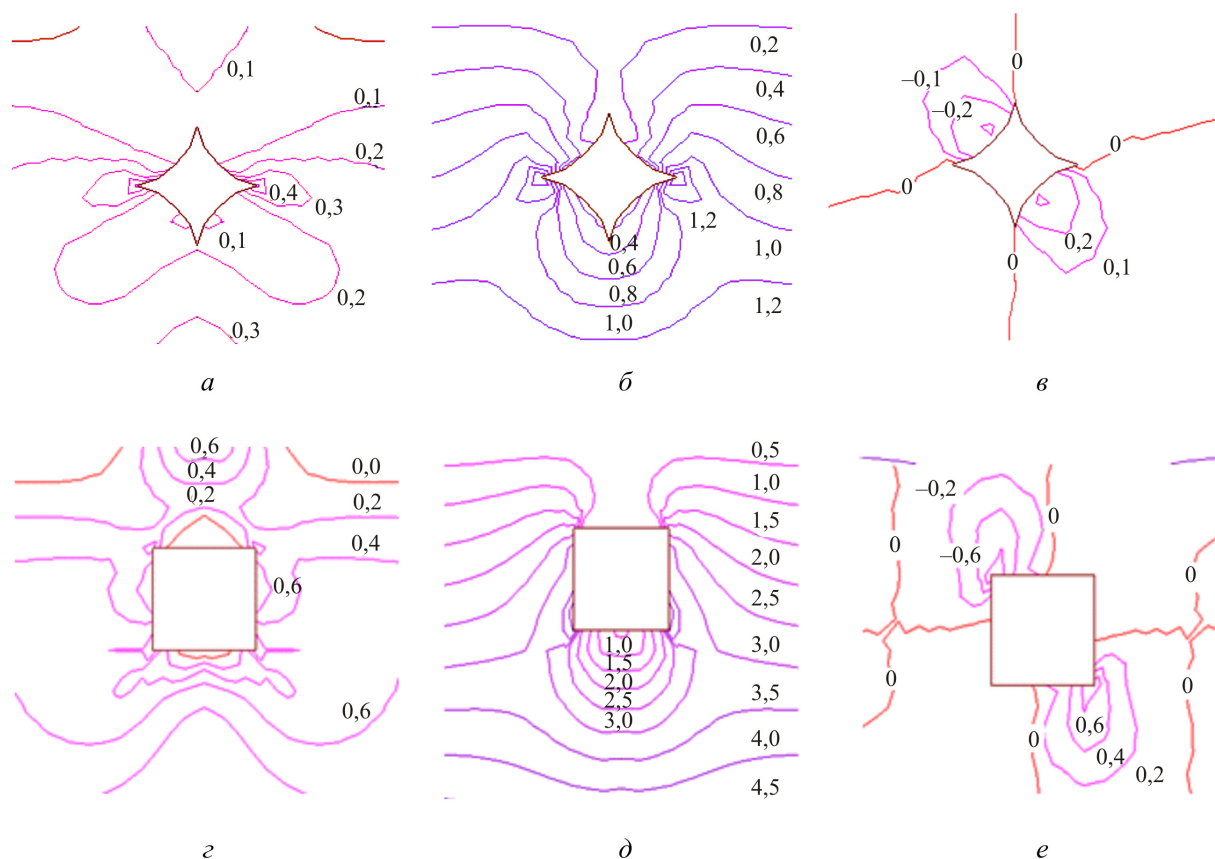


Рис. 11. Картины безразмерных (в долях γH) изолиний вертикальных σ_z , горизонтальных σ_x и касательных τ_{xz} напряжений в окрестности подземных выработок при величине коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,2$ для выработки с поперечным сечением в виде астрыды (а–в) и с поперечным сечением в виде квадрата (г–е)

Fig. 11. Graphs of dimensionless (in fractions γH) isolines of vertical σ_z , horizontal σ_x and tangent τ_{xz} stresses in the vicinity of underground mines with a lateral pressure coefficient of $\xi_0 = 0.2$ for mine with a cross section in the form of an astroid (a–c) and with a square cross-section (d–f)

Выводы

Вертикальные перемещения точек земной поверхности подрабатываемых территорий при всех прочих равных условиях определяются напряженным состоянием вмещающего подземную выработку массива. Если грунтовый массив однороден и изотропен, то численные значения напряжений являются функциями формы, размера, глубины заложения выработки, объемного веса и коэффициента бокового давления грунта массива.

Следовательно, вполне логичной является постановка задачи об отыскании оптимальной формы поперечного сечения горизонтальной подземной выработки, обеспечивающей при всех прочих равных условиях минимальные по величине осадки дневной поверхности подрабатываемой территории. Логичным также является и то, что данная задача должна решаться на основе анализа напряженного состояния вмещающего массива грунта.

Библиографический список

1. 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.
2. Кульпин Л.Г. Баренцево море. Прогноз и преодоление техногенных осложнений при разработке газовых гигантов в условиях гидратонасыщенности придонных слоев и опускания дна моря // Новые технологии разработки и повышения нефтеотдачи: тр. междунар. технолог. симпоз. – М., 2005. – С. 1–8.
3. Осадки грунта, вызванные проходкой тоннелей (на примере Тегеранского метро) / Х. Чакеи, А. Талеминежад, М. Мусави, Б. Юнвер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 4. – С. 12–15.
4. Карасев М.А. Прогноз оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 248–254.
5. 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.
6. Пыжов С.В., Антощенко Н.И., Филатьев М.В. Теоретическое обоснование параметров минимально возможной степени подработанности земной поверхности при выемке угольных пластов // Збірник наукових праць ДонДТУ. – 2014. – № 2 (43). – С. 30–34.
7. Писаренко М.В., Борисов И.Л. Использование ГИС технологий для определения ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности // Маркшейдерия и недропользование. – 2009. – № 1 (39). – С. 69–71.
8. 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.
9. Карасев М.А., Беляков Н.А. Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве станций метрополитена в твердых глинах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 1. – С. 139–155.
10. Бугаева Н.А. Научные основы стохастического прогноза деформаций земной поверхности при ее подработке // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірнично-геологічна». – 2011. – Вип. 13 (178). – С. 63–69.
11. Сдвигание горных пород и земной поверхности при подземных разработках / под общ. ред. проф., д-ра техн. наук В.А. Букринского и канд. техн. наук Г.В. Орлова. – М.: Недра, 1984. – 247 с.
12. ФЕА: св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015617889 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 23 июля 2015 г.
13. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613499 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 30 июня 2009 г.
14. Лapidус Л.С. К вопросу расчета перемещений земной поверхности, вызванных подземными работами // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1961. – № 1. – С. 20–22.
15. Цветков В.К. Определение форм сечения горных выработок с заданными напряжениями на их контурах // ФТПРПИ. – 1986. – № 2. – С. 24–29.
16. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов. – Волгоград: Нижне-Волж. книж. изд-во, 1979. – 238 с.

17. Цветков В.К. Расчет рациональных параметров горных выработок. – М.: Недра, 1993. – 251 с.
18. Цветков В.К., Цветкова Е.В. Аналитическое исследование влияния напряженного состояния грунтовых массивов на их прочностные характеристики // Научные сообщения Волгоградского клуба докторов наук. – Волгоград, 2006. – Бюл. № 15. – С. 16–21.
19. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application / ed. by J.A. Yamamuro, V.N. Kaliakin // *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration*. American Society of Civil Engineers. – 2005. – Vol. 128. – P. 69–98.
20. Bulychev N.S., Fotieva N.N. Maintenance diagnostic of underground structures conditions on base of back analysis of it // *Progress in Tunnelling after 2000 Proc. of the AITES-ITA WorldTunnel Congress*. Milan-Italy, 10–13 June 2001. – Session 1–4. – Vol. I. – Bologna, 2001. – P. 539–546.
21. Bulychev N.S., Fotieva N.N., Deev P.V. The theory of underground structures design has gained strength // *Harmonising rock engineering and the environment – proceedings of the 12th ISRM international congress of rock mechanics*. – Beijing, 2012. – P. 2031–2035.
22. Stability evaluation of large underground openings / N. S Bulychev [et al.] // *EUROCK '93, LISBOA / Portugal: Proc. of ISRM Int. Symp. "Safety and Enviromental Issues in Rock Engineering"*. – Rotterdam, Brookfield, 1993. – P. 191–196.

References

1. Bogomolov A.N., Stepanova E.A., Bogomolova O.A., Tsvetkova E.V., Liburatskov E.M. Chislennyi analiz osedaniia zemnoi poverkhnosti nad gorizontalmymi vyrabotkami [Numerical analysis of subsidence of the earth's surface above the horizontal workings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2016, iss. 45 (64), pp. 12–26.
2. Kul'pin L.G. Barents Sea. Forecast and overcoming of technogenic complications when developing gas giants in the conditions of hydrate saturation of bottom layers and lowering of seabed. *Trudy mezhdunarodnoi tekhnologicheskogo simpoziuma «Novye tekhnologii razrabotki i povysheniya nefteodachi»*. Moscow, 2005, pp. 1–8.
3. Chakeri H., Talebinejad A., Moosavi M., Ünver B. Tunneling-induced ground movements on Tehran Metro. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2012, no. 4, pp. 12–15.
4. Karasev M.A. Prognoz osedaniia zemnoi poverkhnosti pri stroitel'stve podzemnykh sooruzhenii glubokogo zalozheniia v usloviakh Sankt-Peterburga [Prediction of surface settlements duo to construction of underground structures in geological condition of Saint Petersburg]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 204, pp. 248–254.
5. Nizametdinov F. K., Mozer D.V., Gei N.I., Tuyakbai A.S., Karaneeva A.D. Sputnikovyi radarnyi interferometricheskii monitoring podrobotannykh territorii Karagandinskogo ugol'nogo basseina [Satellite radar interferometric monitoring of subsided areas in the Karaganda coal basin]. *Geomatika [Geomatics]*, 2014, no. 4, pp. 70–77.
6. Pyzhov S.V., Antoshchenko N.I., Filat'ev M.V. Teoreticheskoe obosnovanie parametrov minimal'no vozmozhnoi stepeni podrobotannosti zemnoi poverkhnosti pri vyemke ugol'nykh plastov [Theoretical justification for the parameters of lowest possible level of subsided earth surface at the extraction of a coal layer]. *Zbirnik naukovikh prats' DonDTU [Set of scientific works of DonDTU]*, 2014, no. 2 (43), pp. 30–34.
7. Pisarenko M., Borisov I. Ispol'zovanie GIS tekhnologii dlia opredeleniia ozhidaemykh sdvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti [The use of the GIS technologies for calculating the

anticipated movement and deformations of the earth surface]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use], 2009, no. 1 (39), pp. 69–71.

8. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Opredelenie zony vliianiia stroitel'stva kommunikatsionnykh tonneli [Determination of the zone of influence of utility-tunnel construction]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, September 2013, 50 (4), pp. 164–170. DOI: 10.1007/s11204-013-9229-5.

9. Karasev M.A., Belyakov N.A. Prognoz deformatsii zemnoi poverkhnosti pri stroitel'stve stantsii metropolitena v tverdykh glinakh [Estimation of surface settlements troughs due to subway station construction in claystone]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 2016, iss. 1, pp. 139–155.

10. Bugaeva N.A. Nauchnye osnovy stokhasticheskogo prognoza deformatsii zemnoi poverkhnosti pri ee podrabotke [Scientific basis for the stochastic prognosis of the deformations of the earth surface in case of its subsidence]. *Naukovi pratsi DonNTU. Girnicho-geologichna*, 2011, iss. 13 (178), pp. 63–69.

11. Sdvizhenie gornyykh porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnykh razrabotkakh [Movement of rocks and earth surface at underground extraction]. Eds. V.A. Bukrinskii, G.V. Orlov. Moscow, Nedra, 1984, 247 p.

12. Bogomolov A.N. FEA. Certificate of State Registration of the Computer Programme no. 2015617889 dated July 23, 2015.

13. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Nestratov M.Yu., Potapova N.N., Stepanov M.M., Ushakov A.N. Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499 (2009).

14. Lapidus L.S. K voprosu rascheta peremeshchenii zemnoi poverkhnosti, vyzvannykh podzemnymi rabotami [Towards the issue of calculation of earth surface haul caused by underground works]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*, 1961, no. 1, pp. 20–22.

15. Tsvetkov V.K. Opredelenie form secheniia gornyykh vyrabotok s zadannymi napriazheniyami na ikh konturakh [Determination of cross-sectional shapes of minings with predetermined stresses on their contours]. *FTPRPI*, 1986, no. 2, pp. 24–29.

16. Tsvetkov V.K. Raschet ustoichivosti otkosov i sklonov [Calculation of stability of inner sides and slopes]. Volgograd, Nizhne-Volzhscoe Knizhnoe Izdatel'stvo, 1979, 238 p.

17. Tsvetkov V.K. Raschet ratsional'nykh parametrov gornyykh vyrabotok [Calculation of rational parameters of excavations]. Moscow, Nedra, 1993, 291 p.

18. Tsvetkov V.K., Tsvetkova E.V. Analiticheskoe issledovanie vliianiia napriazhennogo sostoianiia gruntovykh massivov na ikh prochnostnye kharakteristiki [An analytical research of the influence of the stress state of soil massifs on their strength characteristics]. *Scientific reports of the Volgograd club of doctors of sciences*. Volgograd, 2006, Bulletin no. 15, pp. 16–21.

19. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. Eds. J.A. Yamamuro, V.N. Kaliakin. *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration*. American Society of Civil Engineers, 2005, vol. 128, pp. 69–98.

20. Bulychev N.S., Fotieva N.N. Maintenance diagnostic of underground structures conditions on base of back analysis of it. *Progress in Tunnelling after 2000 Proc. of the AITES-ITA World Tunnel Congress*. Milan-Italy, 10-13 June 2001. Session 1-4, vol. I, Bologna, 2001, pp. 539–546.

21. Bulychev N.S., Fotieva N.N., Deev P.V. The theory of underground structures design has gained strength. *Harmonising rock engineering and the environment – proceedings of the 12th ISRM international congress of rock mechanics*, Beijing, 2012. pp. 2031–2035.

22. Bulychev N.S. [et al.] Stability evaluation of large underground openings. *EUROCK '93, Proceedings of ISRM Int. Symp. "Safety and Environmental Issues in Rock Engineering"*. Rotterdam, Brookfield, 1993. pp. 191–196.