

УДК 622.261.2 : 539.4

А. Н. Богомолов**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ДЕРИВАЦИОННОГО ТОННЕЛЯ,
НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ГРАВИТАЦИИ,
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАРЯЖЕНИЙ ПО ЕГО КОНТУРУ**

Приведены результаты сопоставления численных значений тангенциальных нормальных напряжений, возникающих в точках контуров подземных выработок различного поперечного сечения под действием сил гравитации. Установлено, что контуры выработок астроида и дельтовидного сечения практически свободны от этих напряжений, а для дельтовидного контура низкий уровень напряжений σ_θ наблюдается при величине коэффициента бокового давления, отличной от рекомендованной В. К. Цветковым. Показано, что уровень напряжений σ_θ в точках астроида и дельтовидного контура на 1...3 порядка меньше, чем в точках контуров традиционной формы. Данное обстоятельство позволяет использовать рассмотренные формы поперечного сечения при проходке временных выработок, что позволит обеспечить кратковременную устойчивость выработок без их укрепления устройством обделок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: контур подземной выработки, устойчивость, коэффициент бокового давления, методы теории функций комплексного переменного, отображающая функция, напряженное состояние, тангенциальное нормальное напряжение, обделка тоннеля.

Results of comparison of numerical values of the tangential normal tension arising in points of contours of underground developments of various cross section under the influence of gravitation forces are given. It is established that contours of developments of astroid and deltoid section are almost free from this tension, and for a deltoid contour the low level of tension σ_θ is observed at the size of lateral pressure coefficient that is different from the one recommended by V. K. Tsvetkov. It is shown that the level of tension σ_θ in points of astroid and deltoid contour 1...3 times less than in points of contours of traditional form. This circumstance allows to use the considered forms of cross section at a driving of temporary developments that will allow to provide short-term stability of the developments without their strengthening by timber setting.

Key words: contour of underground development, stability, lateral pressure coefficient, methods of the theory of complex variable functions, displaying function, stress state, tangential normal tension, timber setting.

Известно, что безнапорные гидротехнические тоннели могут устраиваться в породах, у которых коэффициент крепости по Протодьяконову $f_{кр} > 5$. В этом случае устраивается только конструктивная облицовка тоннеля толщиной 0,07 м, которая не оказывает влияния на напряженное состояние вмещающего массива. Если коэффициент крепости $f_{кр} = 15...20$, то тоннели строятся полностью без обделки [1].

Перечень пород, в которых тоннели можно сооружать и эксплуатировать без устройства обделки, приведен в табл. 1.

Однако нередко возникают ситуации, разрешение которых требует прокладки временных тоннелей в породах, не отвечающих приведенным выше требованиям. Но так как время существования таких тоннелей ограничено очень небольшим промежутком, то очевидно, что в этом случае экономически нецелесообразно устраивать мощную и дорогостоящую обделку, которая будет потеряна для дальнейшего использования.

Т а б л и ц а 1

Классификация горных пород по крепости

Категория	Степень крепости	Порода	$f_{кр}$
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы	20
II	Очень крепкие	Очень крепкие гранитовые породы: кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, менее крепкие, нежели указанные выше, кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки	15
III	Крепкие	Гранит (плотный) и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды	10
IIIa	То же	Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор, доломит. Колчеданы. Обыкновенный песчаник	8
IV	Довольно крепкие	Железные руды. Песчанистые сланцы	6
IV	То же	Сланцевые песчаники	5
V	Средние	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий глинистый сланец и известняк, мягкий конгломерат	4
V	То же	Разнообразные сланцы (некрепкие). Плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс. Мерзлый грунт (антрацит) Обыкновенный мергель. Разрушенный песчаник, сцементированная галька и хрящ, каменистый грунт	2
VIa	То же	Крепкий каменный уголь	1,5
VII	Мягкие	Глина (плотная). Мягкий каменный уголь, крепкий наносно-глинистый грунт	1

Во избежание этого можно воспользоваться приемом, состоящим в определении такой формы сечения подземной выработки, чтобы в каждой его точке напряжения были бы минимальными или равными нулю.

Эту идею впервые, по всей видимости, выдвинул В. К. Цветков [2], который предложил использовать для этих целей методы теории функций комплексного переменного [3].

Для решения задачи им предложена отображающая функция

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$N = -4AC;$$

$$R = -6AD.$$

Используя (1—3), В. К. Цветков установил, что каждому определенному значению коэффициента бокового давления материала вмещающего массива ξ_0 при всех прочих равных условиях соответствует определенная форма поперечного сечения подземной выработки, такая, что в любой точке контура выработки (кроме точек возврата) выполняется условие

$$\sigma_{\theta} = 0. \quad (4)$$

Отметим, что в работах В. К. Цветкова автор не нашел вывода формулы (4), поэтому ее пришлось вывести повторно [4].

В. К. Цветков считал, что при выполнении условия (4) контур выработки будет устойчивым.

На рис. 1 приведены изображения поперечных сечений контуров подземных выработок, в каждой точке которых, кроме точек возврата, выполняется условие (4).

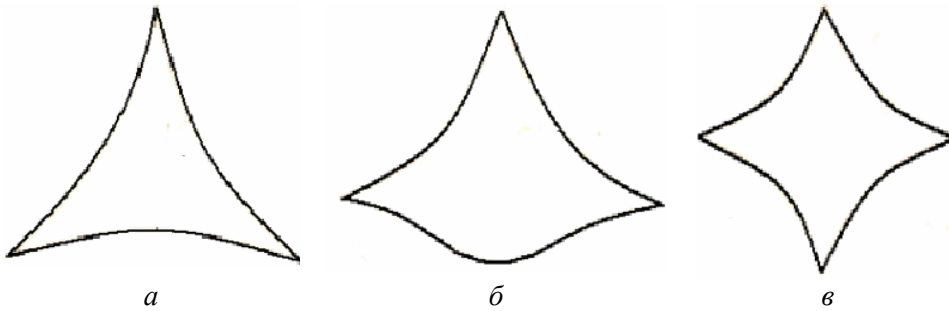


Рис. 1. Сечения подземных выработок со «свободными» от напряжений контурами при значениях коэффициента бокового давления вмещающего массива: а — $\xi_0 = 1$; б — $\xi_0 = 0,5$; в — $\xi_0 = 0,2$

Автором поставлена задача сравнить численные значения напряжений σ_θ , возникающих в точках контуров, форма которых рекомендована в [2], с соответствующими напряжениями, возникающими в точках контуров, форма которых считается традиционной для подземных выработок.

В [5—10] автором рассмотрено менее строгое условие устойчивости контуров подземных выработок, которое основано на понятиях предела прочности пород при растяжении и сжатии:

$$R_{\text{рас}} \leq \sigma_\theta \leq R_{\text{сж}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{рас}}$ и $R_{\text{сж}}$ — значения пределов прочности пород вмещающего массива при растяжении и сжатии соответственно, причем растягивающие напряжения считаются отрицательными, а сжимающие — положительными.

В табл. 2 приведены численные значения величин пределов прочности пород при растяжении и сжатии, взятые из [11], и величины «кажущихся» значений угла внутреннего трения φ^* и удельного сцепления C^* , вычисленные по формулам В. В. Соколовского (6—7), а также соответствующие значения коэффициента бокового давления, подсчитанные по (8):

$$C^* = 0,5(\sigma_{\text{рас}} \times \sigma_{\text{сж}})^{0,5}; \quad (6)$$

$$\varphi^* = \arcsin \frac{\sigma_{\text{сж}} - \sigma_{\text{рас}}}{\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{рас}}}; \quad (7)$$

$$\xi_0 = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (8)$$

Т а б л и ц а 2

Прочностные свойства горных пород

Скальная порода	$R_{\text{сж}}$, МПа	$R_{\text{рас}}$, МПа	$f_{\text{кр}}$	φ^* , град	C^* , МПа	ξ_0
Гранит	230	12	23	64,3	26,3	0,05
Габбро	255	13	26	64,6	28,8	0,05
Базальт	275	21	28	59,1	38,0	0,07
Кварцит	305	10	31	69,5	27,6	0,03
Скарн	225	19	23	57,6	32,7	0,08
Сланец песчанистый	51	13	5	36,4	12,9	0,22
Сланец глинистый	87	15	9	44,9	18,1	0,16
Известняк кремнистый	242	7	24	70,7	20,6	0,03
Известняк хемогенный	95	10	10	54,0	15,4	0,10
Песчаник	78	12	8	47,2	15,3	0,14
Аргиллит	54	3	5,4	63,5	6,4	0,05
Андезит	97	6	10	62,1	12,1	0,06
Туф	116	7	12	62,4	14,2	0,06
Доломит	162	7	16	66,5	16,8	0,04
Сиенит	215	14	22	61,4	27,4	0,06
Кератофир	301	14	30	65,7	32,5	0,05
Альбитофир	173	12	17	60,5	22,8	0,07
Диабаз	343	13	34	68,0	33,4	0,04

Как видим, из рассмотренных в табл. 2 пород наиболее слабой является песчанистый сланец, для которого $f_{кр} = 5$, а величина коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,22$.

На рис. 1 два сечения подземных выработок имеют форму двух гипоциклоид — дельтоиды и астроида. Согласно решению В. К. Цветкова [2], напряжения в точках контура выработок такой формы будут равны нулю при величине коэффициента бокового давления $\xi_0 = 1$ и $\xi_0 = 0,2$ соответственно. Выбор этих видов сечений объясняется тем, что величина коэффициента бокового давления, соответствующая сечению в виде астроида, практически совпадает с величиной ξ_0 , которой соответствует выбранная порода, а величина ξ_0 , соответствующая сечению в виде дельтоиды, отличается от него почти в пять раз.

Выполним расчет напряженного состояния контуров подземных выработок, расположенных на различной глубине, имеющих дельтовидную, астроидавидную, круговую и корытообразную формы поперечного сечения.

Последние две формы поперечного сечения являются типовыми для безнапорных гидротехнических тоннелей (рис. 2).

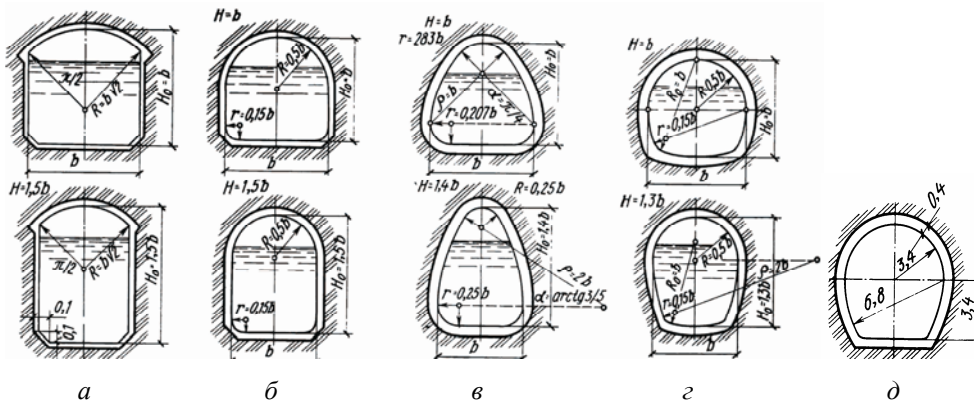


Рис. 2. Типовые формы поперечных сечений безнапорных тоннелей: а — прямоугольная с пологим сводом; б — корытообразная с полуциркульным сводом; в — корытообразная с уширенным основанием; г — подковообразная; д — круговая с уширенным основанием (для напорного туннеля)

Расчет напряженного состояния в окрестностях подземной выработки выполнен при помощи компьютерной программы «Устойчивость. Напряженное состояние» [12], в которой для этих целей формализован в том числе и метод конечных элементов (МКЭ).

Считается, что граничные условия, накладываемые на расчетную конечно-элементную схему, практически не влияют на результаты вычислений напряжений МКЭ, если границы расчетной схемы удалены от ее исследуемой части не менее чем на шесть максимальных размеров последней. Все расчетные схемы составлены с учетом этого обстоятельства. Причем расчетная конечно-элементная схема с максимальным количеством элементов состоит из 7567 треугольных конечных элементов, сопряженных в 7567 узлах, а максимальная ширина матрицы жесткости системы равна 2060.

В результате проведения вычислений построены эпюры напряжений σ_θ , действующих в точках контуров подземных выработок, расположенных на глубине 30 м и 80 м при условии, что величина коэффициента бокового

давления вмещающего массива $\xi_0 = 0,2$, а диаметр круглой выработки $d = 10$ м. Размеры других выработок связаны с диаметром круглой выработки d так, как это показано на рис. 3.

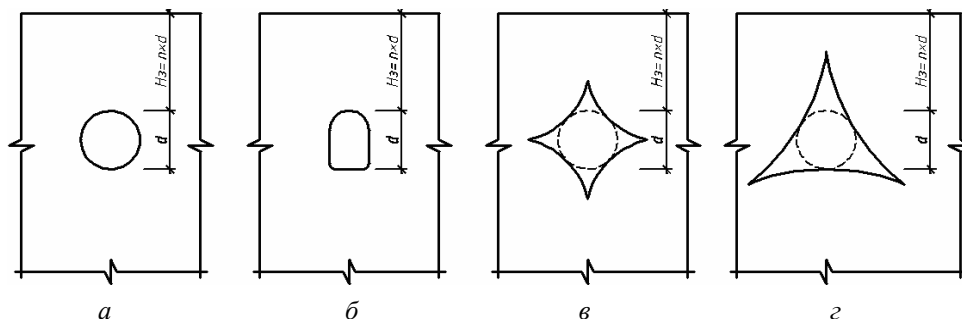


Рис. 3. Соотношение размеров подземных выработок различной формы: *a* — круговой контур; *б* — корытообразный контур; *в* — астроидавидный контур; *г* — дельтовидный контур

Анализируя эпюры напряжений σ_θ , построенных по линии контуров круглого и корытообразного сечений (рис. 4), можно сделать следующие выводы:

1. В верхней части потолочины выработок в обоих случаях присутствуют зоны растягивающих напряжений σ_θ , а в нижней части круговой выработки сжимающие напряжения σ_θ очень малы по величине; в нижней части корытообразной выработки для обеих глубин заложения напряжения σ_θ являются растягивающими.

2. В средней части обоих сечений напряжения σ_θ практически равны по величине, разница составляет 1...7 %.

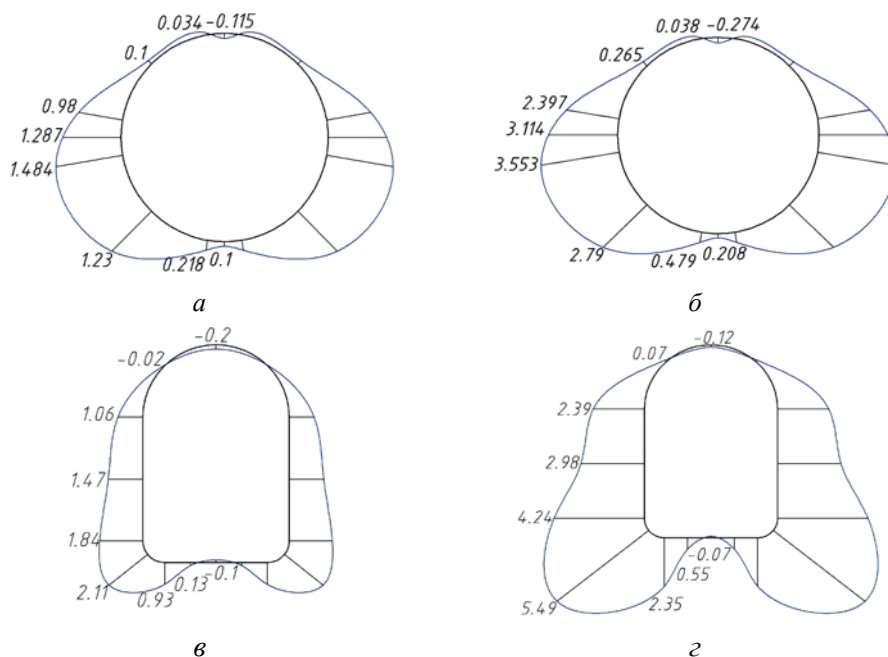


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_θ , МПа для различных форм сечений подземных выработок, расположенных на глубине 30 м и 80 м соответственно: *a, б* — круглой; *в, г* — корытообразной

Если проанализировать в том же контексте эпюры напряжений, построенные для случаев, когда сечения подземных выработок имеют форму астроида и дельтоиды (рис. 5), то можно сделать выводы:

1. Своды обоих сечений практически свободны от напряжений σ_θ , величины которых на 1...3 порядка ниже, чем значения этих напряжений в точках, расположенных в верхних частях круглого и корытообразного контуров.
2. В точках всего контура выработки астроида сечения и точках сводов выработки дельтовидной формы полностью отсутствуют растягивающие напряжения. Они отмечены лишь в подошве дельтовидной выработки.
3. Существенные концентрации напряжений σ_θ наблюдаются лишь в нижних точках возврата дельтовидного сечения и средних точках возврата астроида сечения. Однако численные значения этих напряжений являются величинами одного порядка с численными значениями напряжений в нижних частях круглого и корытообразного контуров.

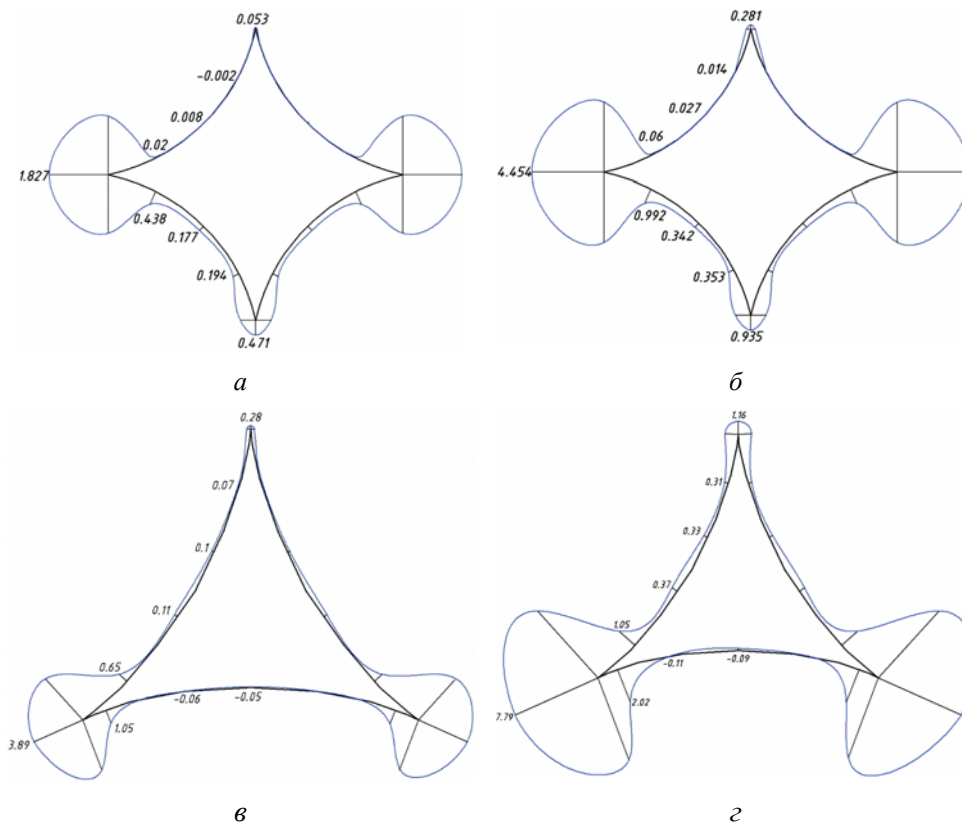


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_θ , МПа, для различных форм сечений подземных выработок, расположенных на глубине 30 м и 80 м соответственно: а, б — астроида; в, г — дельтовидной

Таким образом, контуры подземных выработок, имеющих астроида и дельтовидную формы поперечного сечения, являются во много раз менее напряженными по сравнению с контурами сечений тривиальной формы. Они могут быть использованы при проходке временных подземных выемок без крепления сводов и оснований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мостков В. М.* Подземные гидротехнические сооружения. М. : Высшая школа, 1986. 464 с.
 2. *Цветков В. К.* Определение форм сечения горных выработок с заданными напряжениями на их контурах // ФТПРПИ. 1986. № 2. С. 24—29.
 3. *Мухелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966. 708 с.
 4. *Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.* О формуле для тангенциального нормального напряжения в точках границы бесконечной односвязной области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 24—29.
 5. Постановка задачи о «восстановлении сечения контура» подземной выработки / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Прокопенко // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : материалы Всерос. научн.-техн. конф. с международным участием «Геонауки-2013: актуальные проблемы изучения недр». Иркутск : Иркутский государственный технический университет, 2013. Вып. 13. С. 381—385.
 6. 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. Сер.: Строит. информатика. 2012. Вып. 8(24). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8\(24\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8(24).pdf) (дата обращения : 28.08.2014).
 7. Отыскание рационального контура подземной выработки на основе условия прочности Кулона / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 20—26.
 8. 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. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2013_2(27).pdf) (дата обращения : 28.08.2014).
 9. Пример определения безопасной глубины заложения горизонтальной выработки сложного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, С. Л. Шолудько, А. В. Соловьев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 33(52). С. 6—12.
 10. Задача об отыскании рациональной формы свода горизонтальной подземной выработки / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов, А. В. Прокопенко // Сб. науч. тр., посвящ. 80-летию К. Ш. Шадунца «Инженерные подходы к решению геотехнических задач». Краснодар : Краснодарский государственный аграрный университет, 2013. С. 9—21.
 11. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв и др. М. : Наука, 2005. 1024 с.
 12. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ : пат. № 2009613499 / А. Н. Богомолов, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Потапова и др. ; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009.
-
1. *Mostkov V. M.* Podzemnye gidrotekhnicheskie sooruzheniya. M. : Vysshaya shkola, 1986. 464 s.
 2. *Tsvetkov V. K.* Opredelenie form secheniya gornykh vyrobotok s zadannymi napryazheniyami na ikh konturakh // FTPrPI. 1986. № 2. S. 24—29.
 3. *Muskhelishvili N. I.* Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti. M. : Nauka, 1966. 708 s.
 4. *Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A.* O formule dlya tangentsial'nogo normal'nogo napryazheniya v tochkakh granitsy beskonechnoi odnosvyaznoi oblasti // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2014. Vyp. 36(55). S. 24—29.
 5. Postanovka zadachi o «vosstanovlenii secheniya kontura» podzemnoi vyrobotki / A. N. Bogomolov, A. N. Ushakov, D. V. Pavlov, M. O. Podlinev, A. V. Prokopenko // Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy : materialy Vseros. nauchn.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem «Geonauki-2013: aktual'nye problemy izucheniya neдр». Irkutsk : Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013. Vyp. 13. S. 381—385.

6. Analiz napryazhennogo sostoyaniya gruntovogo massiva, vmeshchayushchego podzemnye prostranstva razlichnoi konfiguratsii / A. N. Bogomolov, S. V. Kuznetsova, V. N. Sinyakov, M. A. Shubin, V. P. Dyba, G. M. Skibin, Yu. I. Olyanskii, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Stroit. informatika. 2012. Vyp. 8(24). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8\(24\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8(24).pdf) (data obrashcheniya : 28.08.2014).
7. Otyskanie ratsional'nogo kontura podzemnoi vyrabotki na osnove usloviya prochnosti Kulona / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov, M. O. Podlinev, D. V. Pavlov // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Str-vo i arkhitekt. 2014. Vyp. 35(54). S. 20—26.
8. Opredelenie predel'noi glubiny zalozeniya gorizontal'nykh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. A. Shubin, D. V. Pavlov, M. O. Podlinev, A. V. Solov'ev // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2013. Vyp. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2013_2(27).pdf) (data obrashcheniya : 28.08.2014).
9. Primer opredeleniya bezopasnoi glubiny zalozeniya gorizontal'noi vyrabotki slozhnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, S. L. Sholud'ko, A. V. Solov'ev // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Str-vo i arkhitekt. 2013. Vyp. 33(52). S. 6—12.
10. Zadacha ob otyskanii ratsional'noi formy svoda gorizontal'noi podzemnoi vyrabotki / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov, M. O. Podlinev, D. V. Pavlov, A. V. Prokopenko // Sb. nauch. tr., posvyashch. 80-letiyu K. Sh. Shaduntsa «Inzhenernye podkhody k resheniyu geotekhnicheskikh zadach». Krasnodar : Krasnodarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2013. S. 9—21.
11. Gruntovedenie / V. T. Trofimov, V. A. Korolev i dr. M. : Nauka, 2005. 1024 s.
12. Ustoychivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie): svidetel'stvo o gos. registratsii programm dlya EVM : pat. № 2009613499 / A. N. Bogomolov, M. Yu. Nestratov, N. N. Potapova i dr. ; opubl. 18.12.2009, Byul. № 23 ; zayavl. 19.05.2009 ; zareg. v Reestre programm dlya EVM 30.06.2009.

© Богомолов А. Н., 2014

*Поступила в редакцию
в декабре 2014 г.*

Ссылка для цитирования:

Богомолов А. Н. Влияние формы сечения деривационного тоннеля, находящегося под действием сил гравитации, на распределение напряжений по его контуру // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35). Ст. 13. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Bogomolov A. N. [Influence of the section shape of derivational tunnel that is under the influence of gravitation forces on tension distribution across its contour]. Internet-Vestnik VolgGASU, 2014, no. 4(35), paper 13. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>