

УДК 622.28

П.В. Деев, О.А. Тормышева, О.М. Левищева

ДЕЕВ ПЕТР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – доктор технических наук, доцент кафедры механики материалов (Тульский государственный университет, Тула).

E-mail: dodysya@yandex.ru

ТОРМЫШЕВА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры механики материалов (Тульский государственный университет, Тула).

E-mail: knopka85@bk.ru

ЛЕВИЩЕВА ОКСАНА МИХАЙЛОВНА – аспирант (Тульский государственный университет, Тула).

E-mail: luckywomen888@mail.ru

Оценка напряженного состояния целиков между выработками произвольной формы при сейсмических воздействиях землетрясений

Предложена методика оценки напряженного состояния целиков между параллельными выработками произвольного поперечного сечения при сейсмических воздействиях землетрясений. В основе методики лежат аналитические решения плоских задач теории упругости о напряженном состоянии бесконечной линейно-деформируемой весомой среды, ослабленной отверстиями произвольной формы при действии на бесконечности неравнокомпонентного двухосного сжатия и чистого сдвига. Методика позволяет определить направление прихода сейсмических волн, соответствующее наиболее невыгодному случаю нагружения целика между выработками. Приводится пример расчета.

Ключевые слова: целик, напряженное состояние, землетрясение, сейсмические волны, квазистатическая задача.

В настоящее время для оценки устойчивости горных выработок и междукамерных целиков наряду с методами численного моделирования [4] применяется подход, использующий аналитические решения соответствующих плоских задач теории упругости. Указанная методика, впервые предложенная в работе [1], позволяет оценить устойчивость выработки, используя в качестве критерия максимальный размер условной зоны неупругих деформаций, измеряемый по нормали к контуру выработки. Очертания и размеры условной зоны определяются из аналитического решения плоской задачи теории упругости на основе условия прочности Кулона–Мора.

При оценке устойчивости выработок, расположенных в сейсмически активных районах, следует учитывать, что направление, в котором распространяются сейсмические волны в плоскости поперечного сечения выработки, не может быть известно заранее, до того как произошло землетрясение. Расчет подземных конструкций на сейсмические воздействия землетрясения заданной интенсивности в соответствии с действующими нормативными

© Деев П.В., Тормышева О.А., Левищева О.М., 2014

Работа поддержана грантом Президента РФ МД-1546.2014.05. Статья основана на сообщениях и докладах, представленных на 4-й Российско-Китайской научной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», которая состоялась в Дальневосточном федеральном университете (27–31 июля 2014, Владивосток, Россия) при поддержке Инженерной школы ДВФУ, РФФИ и Программы развития ДВФУ. Участники конференции подготовили эти материалы специально для журнала.

[72]

документами предусматривает аналитическое определение наихудшего напряженного состояния, которое может возникнуть в каждом рассматриваемом нормальном сечении подземной конструкции [5]. Однако в случае, когда требуется оценить устойчивость массива вокруг выработки, отсутствует критерий, с помощью которого можно было бы аналитически определить направление прихода сейсмических волн, соответствующее наихудшему напряженному состоянию массива в окрестности выработки [6].

Если требуется оценить напряженное состояние целика между параллельными выработками, в качестве критерия можно принять величину среднего вертикального напряжения в целике, обусловленного действием сейсмических волн. Впервые такой подход был использован для оценки напряженного состояния целика между двумя одинаковыми круговыми выработками в работе [8]. В настоящей статье предпринята попытка распространить указанный подход на целики между выработками произвольного поперечного сечения.

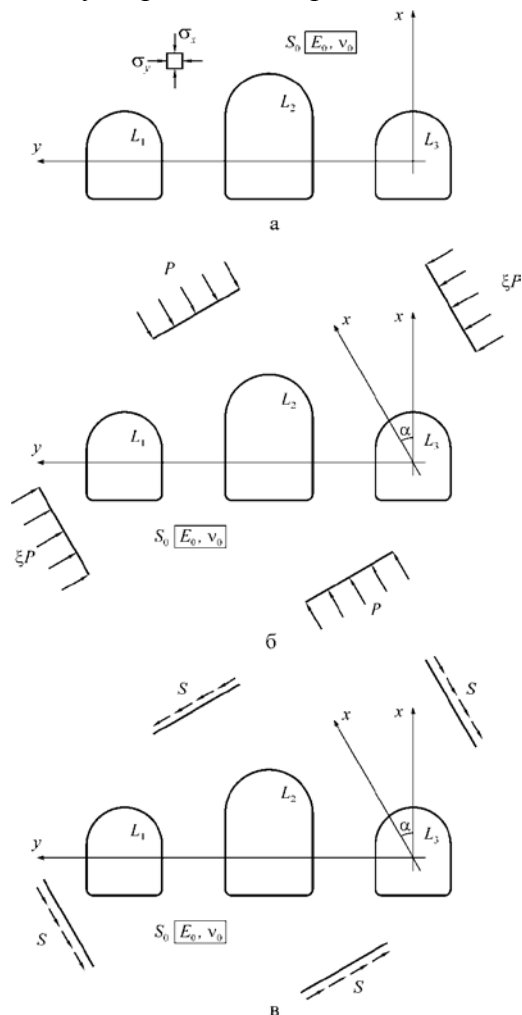


Рис. 1. Расчетные задач теории упругости, используемых при оценке напряженного состояния целиков между выработками при расчете на действие собственного веса пород (а), действия продольных (б) и поперечных (в) сейсмических волн

В качестве инструмента расчета используются аналитические методы определения напряженного состояния массива пород в окрестности параллельных выработок произвольного поперечного сечения при действии собственного веса пород [3] и сейсмических воздействиях землетрясений [9]. Расчетные схемы задач теории упругости, положенных в основу методов расчета, представлены на рис. 1.

Здесь массив пород моделируется линейно-деформируемой бесконечной средой S_0 , деформационные характеристики которой описываются модулем упругости E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 . Среда ослаблена конечным числом отверстий произвольной формы, контуры которых свободны от внешних сил. Если рассматривается действие собственного веса пород (см. рис. 1, а), среда полагается весомой, действие продольных волн моделируется наличием на бесконечности неравнокомпонентного двухосного сжатия (растяжения) (см. рис. 1, б), действие поперечных волн – наличием на бесконечности чистого сдвига (см. рис. 1, в).

Величины напряжений, действующих на бесконечности, определяются в соответствии с действующими нормативными документами [2, 7] по следующим формулам:

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0; \quad \xi = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0}; \quad S = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_2 T_0, \quad (1)$$

где k_c – коэффициент сейсмичности, равный 0,025, 0,05, 0,1 при расчетной сейсмичности площадки 7, 8, 9 баллов соответственно; γ – расчетное значение объемного веса грунта (породы); c_1, c_2 – скорости продольных и поперечных волн; T_0 – преобладающий период колебаний частиц породы, с.

Решение поставленных задач было получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного, модификации метода Д.И. Шермана применительно к определению напряженного состояния кусочно-однородных многосвязных областей [10], конформных отображений и комплексных рядов.

Для определения направления распространения сейсмических волн, соответствующего наихудшему напряженному состоянию целика между выработками, в соответствии с подходом,

предложенным в работе [8], будем рассматривать три плоских задачи теории упругости при действии на бесконечности всестороннего сжатия (первая задача) и чистого сдвига в случае, когда главные касательные напряжения на бесконечности образуют с координатными осями угол $\pi/4$ (вторая задача) и параллельны им (третья задача).

Среднее вертикальное напряжение в целике между выработками определим как интеграл

$$\sigma_x^{(cp)} = \frac{1}{l} \int_{z_1}^{z_2} \sigma_x dz, \quad (2)$$

где l – расстояние между выработками; z_1, z_2 – комплексные координаты точек в декартовой системе координат.

Средние вертикальные напряжения, получаемые из решения трех рассматриваемых задач, обозначим соответственно $\sigma_x^{(cp)}(I), \sigma_x^{(cp)}(II), \sigma_x^{(cp)}(III)$.

Максимальные средние напряжения в целике, получаемые при одновременном действии продольных волн в фазе сжатия и поперечных волн в противоположных фазах, можно определить по формуле, приведенной в работе [8]:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(cp)} = & \frac{1+\xi}{4} \sigma_x^{(cp)}(I) + \left(\frac{1-\xi}{2} \cos 2\alpha \mp S/P \sin 2\alpha \right) \sigma_x^{(cp)}(II) + \\ & + \left(\frac{1-\xi}{2} \sin 2\alpha \pm S/P \cos 2\alpha \right) \sigma_x^{(cp)}(III). \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения направления прихода волн, соответствующего максимальному среднему напряжению в целике, необходимо исследовать функцию (3) на экстремум. В результате получим формулу для определения двух вероятных направлений прихода сейсмических волн, соответствующих максимумам среднего вертикального напряжения в целике:

$$\alpha_{1,2} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{S/P \sigma_x^{(cp)}(III) \mp \sigma_x^{(cp)}(II)}{S/P \sigma_x^{(cp)}(II) \pm \sigma_x^{(cp)}(III)}. \quad (4)$$

Выбор нужного значения угла α производится с помощью сравнения соответствующих величин среднего напряжения. После этого строятся условные зоны неупругих деформаций и по их размерам и очертанию делается вывод об устойчивости выработок.

В качестве примера расчета рассмотрим две выработки квадратного сечения (рис. 2), пройденных в массиве пород с деформационными характеристиками $E_0 = 15000$ МПа, $\nu_0 = 0,3$. Исходные данные для расчета следующие: объемный вес пород $\gamma = 0,021$ МН/м³; коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве $\lambda = 0,6$; прочностные характеристики пород $C = 1,3$ МПа, $\varphi = 35^\circ$; глубина заложения $H = 150$ м.

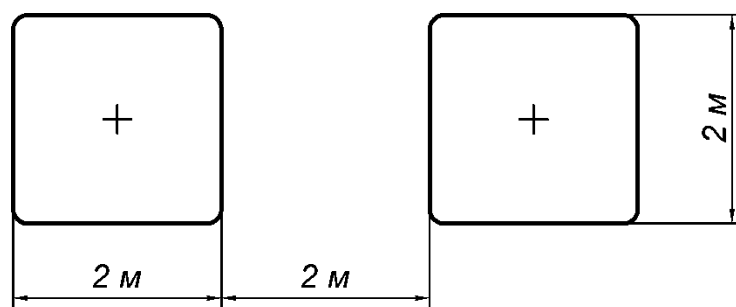


Рис. 2. Размеры и форма рассматриваемых выработок

Угол между распространением сейсмических волн в массиве и горизонталью, определенный по представленной методике, равен $\pm 22,5^{\circ}$. На рис. 3 представлены границы условных зон неупругих деформаций, полученные с использованием описанной методики. Здесь и далее сплошные линии соответствуют границам зон, полученных при совместном действии собственного веса пород, продольных и поперечных волн, одновременно приходящих с наиболее невыгодного направления, пунктирные линии – границам зон, полученных при действии только собственного веса пород.

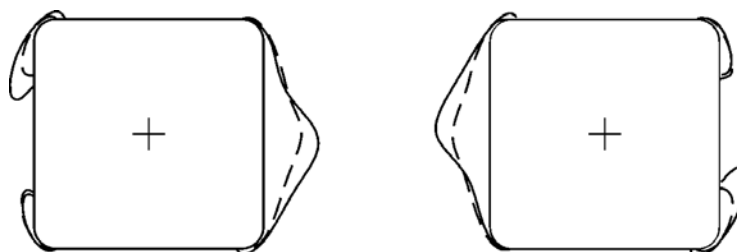


Рис. 3. Границы условных зон неупругих деформаций вокруг рассматриваемых выработок

Максимальный размер условных зон, измеряемый по нормали к контуру выработки, составляет 0,33 м при действии только собственного веса пород и 0,48 м – при землетрясении. Согласно классификации, предложенной в работе [1], рассматриваемые выработки можно отнести к III категории устойчивости при действии только собственного веса пород и к IV категории – при суммарном действии собственного веса пород и одновременно приходящих сейсмических волн.

На рис. 4 приведены эпюры нормальных тангенциальных напряжений на контурах рассматриваемых выработок.

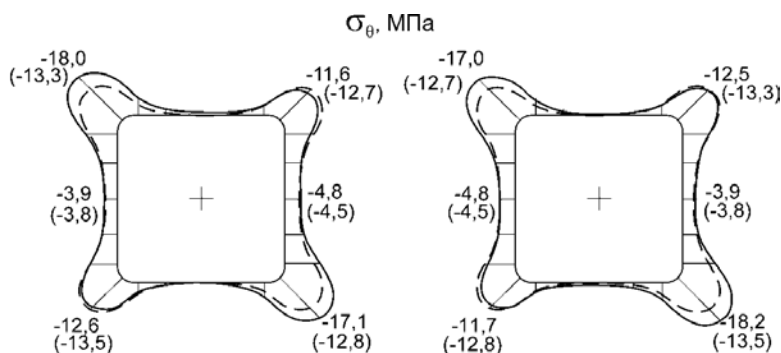


Рис. 4. Эпюры тангенциальных напряжений на контурах выработок

На рис. 5 даны эпюры вертикальных напряжений, возникающих в целике на линии, соединяющей центры выработок.

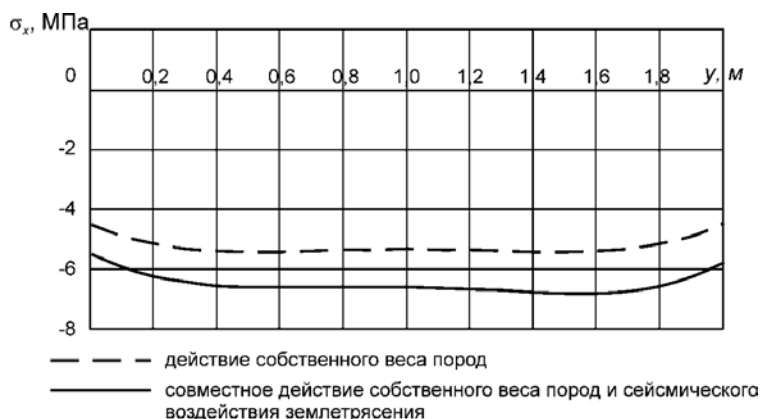


Рис. 5. Эпюра вертикальных напряжений в целике на линии, соединяющей центры выработок

Предложенная в статье методика оценки напряженного состояния целиков между параллельными выработками произвольной формы поперечного сечения при сейсмических воздействиях землетрясений позволяет определить наиболее невыгодное напряженное состояние массива пород вокруг параллельных выработок, которое может возникнуть при землетрясении заданной интенсивности без перебора возможных вариантов направлений прихода сейсмических волн и численного решения достаточно сложных динамических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Н.С., Фотиева Н.Н. Оценка устойчивости пород вокруг горных выработок // Шахтное строительство. 1977. № 3. С. 16–22.
2. ВСН 193-81. Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей. М.: Минтрансстрой, 1981. 69 с.
3. Деев П.В. Математическое моделирование взаимодействия обделок параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения с массивом грунта // Изв. ТулГУ. Естественные науки. 2011. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 291–300.
4. Ломакин И.С., Евсеев А.В. Экспериментальное и численное исследование влияния подстилающего слоя мергеля на несущую способность междукамерных целиков // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 35–39.
5. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. М.: Стройиздат, 1983. 273 с.
6. Саммаль А.С., Фотиева Н.Н., Деев П.В. Оценка устойчивости пород вокруг горных выработок при тектонических и сейсмических воздействиях // Горный информ.-аналит. бюл. 2003. № 5. С. 186–189.
7. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная версия СНиП II-7-81*. М.: ЦПП, 2011. 91 с.
8. Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах. М.: Недра, 1980. 222 с.
9. Фотиева Н.Н., Булычев Н.С., Деев П.В. Оценка несущей способности обделок параллельных тоннелей глубокого заложения, расположенных в сейсмических районах // Изв. Тульск. гос. ун-та. Естественные науки. (Сер. Науки о Земле). Вып. 4. 2009. С. 182–187.
10. Фотиева Н.Н., Козлов А.Н. Расчет крепи параллельных выработок в сейсмических районах. М.: Недра, 1992. 231 с.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Deev P.V., Tormysheva O.A., Levischeva O.M.

PETR V. DEEV, Doctor of Technical Science, Assistant Professor, e-mail: dodysya@yandex.ru;
OLGA A. TORMYSHEVA, PhD (Technical Science), Assistant Professor, e-mail: knopka85@bk.ru;
OKSANA M. LEVISHEVA, Postgraduate Student, e-mail: luckywomen888@mail.ru. Tula State University, Tula.

The estimation of the stress state in pillars between the excavations of arbitrary shape under earthquake seismic effects

The article offers a new technique to estimate the stress state of pillars between the parallel excavations of arbitrary cross section under earthquake seismic effects. The technique is based on the analytical solutions of the plane problems of the elasticity theory considering the stress state of infinite medium weakened by the holes of arbitrary shape under the action of non-equal stress and pure shear on the infinities. The procedure enables one to calculate the direction of seismic wave propagation corresponding to the worst case of pillar loading. The examples of the calculations are given in it.

Key words: pillar, stress state, earthquake, seismic waves, quasi-static problems.

This work was supported by grant from President of Russian Federation MD-1546.2014.05

REFERENCES

1. Bulychev N.S., Fotieva N.N. Estimation of rock stability around mining openings. Mine construction. 1977;3:16-22. (in Russ.). [Bulychev N.S., Fotieva N.N. Ocenka ustojchivosti porod vokrug gornyh vyrabotok // Shahtnoe stroitel'stvo. 1977. № 3. S. 16-22].
2. VSN 193-81. Instruction of seismic effects taking into account in rock transport tunnels design. Moscow, Mintransstroy, 1981. 69 p. (in Russ.). [VSN 193-81. Instrukcija po uchetu sejsmicheskikh vozdeystvij pri proektirovanii gornyh transportnyh tonnelej. M.: Mintransstroj, 1981. 69 s.]
3. Deev P.V. Mathematical modelling of interaction of transport tunnels linings of arbitrary cross section shape with the rock mass. Izvestija TulGU. Natural sciences. 2011;1:291-300. (in Russ.). [Deev P.V. Matematicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya obdelok parallel'nyh tonnelej proizvol'nogo poperechnogo sechenija s massivom grunta. Izvestija TulGU. Estestvennye nauki. 2011, Vyp. 1, Tula: Izd-vo TulGU. S. 291-300].
4. Lomakin I.S., Evseev A.V. Experimental and numerical investigation of subjacent bed of marl influencing on bearing capacity of interchamber pillars. Izvestija TulGU. Earth sciences. 2010;2:35-39. (in Russ.). [Lomakin I.S., Evseev A.V. Jeksperimental'noe i chislennoe issledovanie vlijanija podstilajushhego sloja mergelja na nesushhuju sposobnost' mezhdukamernyh celikov. Izvestija TulGU. Nauki o Zemle. 2010. № 2. S. 35-39.]
5. Guide on projecting of mining openings and support design. Moscow, Stroyizdat, 1983, 273 p. (in Russ.). [Rukovodstvo po proektirovaniju podzemnyh gornyh vyrabotok i raschetu krepj. M.: Strojizdat. 1983. 273 s.]
6. Sammal A.S., Fotieva N.N., Deev P.V. Estimation of rock mass stability around mine excavations under seismic and tectonic effects. GIAB. 2003;5:186-189. (in Russ.). [Sammal' A.S., Fotieva N.N., Deev P.V. Ocenka ustojchivosti porod vokrug gornyh vyrabotok pri tektonicheskikh i sejsmicheskikh vozdeystvijah. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2003. № 5. S. 186-189.]
7. SP 14.13330.2011. Building in seismic regions. Actualized version of SNiP II-7-81*. Moscow, TzPP, 2011, 91 p. (in Russ.). [SP 14.13330.2011 Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah. Aktualizirovannaja versija SNiP II-7-81*. M.: OAO «CPP», 2011, 91 s.]
8. Fotieva N.N. Design of underground structures support in seismic regions. Moscow, Nedra, 222 p. (in Russ.). [Fotieva N.N. Raschet krepj podzemnyh sooruzhenij v sejsmicheski aktivnyh rajonah. M.: Nedra, 1980, 222 s.]

The work has been supported by a grant from the President of the Russian Federation MD-1546.2014.05

9. Fotieva N.N., Bulichev N.S., Deev P.V. Investigation of dependencies of deep multiple tunnel lining stress state on main influencing factors during the earthquakes. *Izvestija TulGU. Earth sciences*, 2009;(4):182-187. (in Russ.). [Fotieva N.N., Bulychev N.S., Deev P.V. Ocenka nesushhej sposobnosti obdelok parallel'nyh tonnej glubokogo zalozhenija, raspolozhennyh v sejsmicheskikh rajonah // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki. Serija «Nauki o Zemle»*. 2009. Vyp. 4. S. 182-187.]
10. Fotieva N.N., Kozlov A.N. Design of parallel excavations in seismic regions. Moscow, Nedra, 1992, 231 p. (in Russ.). [Fotieva N.N., Kozlov A.N. Raschet krepj parallel'nyh vyrabotok v sejsmicheskikh rajonah. M.: Nedra, 1992. 231 s.]