

Для цитирования: Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М., Жукова К.С. Напряженное состояние системы трех параллельных туннелей без обделки от собственного веса анизотропного скального массива. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (4):162-171. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-162-171

For citation: Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M., Zhukova K.S. Stressed state of a system of three parallel tunnels without drawing from own weight of an anisotropic rock massif. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(4):162-171. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-162-171

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 502/504: 69.035.4: 539.31

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-4-162-171

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ТРЕХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТУННЕЛЕЙ БЕЗ ОБДЕЛКИ ОТ СОБСТВЕННОГО ВЕСА АНИЗОТРОПНОГО СКАЛЬНОГО МАССИВА

Баутдинов Д.Т.¹, Джамалудинов М.М.², Жукова К.С.³

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия,

²АО «ЧиркейГЭСстрой»,

²357506, Россия, г. Пятигорск, пос. Энергетик, ул. Подстанционная, 18, Россия,

³ООО «РТ - СоцСтрой»,

³121151, г. Москва, наб. Тараса Шевченко, 23а, Россия,

¹e-mail: d Amir.tt1@mail.ru, ²e-mail: Djamaludinov86@mail.ru,

³e-mail: zhukova.kristina.sergeevna@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является проведение параметрического анализа напряженного состояния анизотропного скального массива на контурах выработок системы трех параллельных туннелей круговой формы без обделки от собственного веса массива, при различных отношениях упругих характеристик скального массива в ортогональных направлениях, и при различных расстояниях между туннелями, используя модель трансверсально-изотропной среды. **Метод.** Расчет системы из трех параллельных туннелей без обделки большой протяженности, проложенных в крепком трансверсально-изотропном скальном массиве, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей параллельные выработки. Применена модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой скальный массив в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а в перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками. Напряженное состояние было исследовано методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип конечного элемента, пригодного для расчета на основе решения в программном комплексе верификационной задачи Кириша. **Результат.** Определены относительные тангенциальные напряжения на контурах трех параллельных туннелей в зависимости от степени анизотропии скального массива и в зависимости от расстояния между параллельными туннелями. Проведена оценка влияния расстояния между туннелями на напряженное состояние на контурах трех параллельных туннелей, в зависимости от степени анизотропии. **Вывод.** Результаты параметрического анализа показывают, что на напряженное состояние существенное влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств грунтового массива и расстояние между туннелями. При проектировании подземных сооружений необходимо учитывать анизотропию упругих свойств грунтового массива; более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов и особое внимание уделять упругим характеристикам. Учет трансверсальной-изотропии и расстояния между туннелями ведет как к увеличению, так и к уменьшению тангенциальных напряжений на контурах параллельных туннелей. При некоторых отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях, независимо от расстояния между туннелями, на контурах туннелей отсутствуют растягивающие напряжения, что благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Ключевые слова: модуль деформации, коэффициент Пуассона, трансверсально-изотропная среда, система трех параллельных туннелей, теория упругости

BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESSED STATE OF A SYSTEM OF THREE PARALLEL TUNNELS WITHOUT DRAWING FROM OWN WEIGHT OF AN ANOTROPHONE ROCK MASSIF

Damir T. Bautdinov¹, Magomed M. Djamaludinov², Kristina S. Zhukova³

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

¹49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127550, Russia,

²JSC «ChirkeyGESstroy»,

²18 Podstancionnaya Str., Pyatigorsk 357506, Russia,

³LLC RT – SotsStroy,

³23a Tarasa Shevchenko quay, Moscow 3121151, Russia,

¹e-mail: damir.tt1@mail.ru, ²e-mail: Djamaludinov86@mail.ru,

³e-mail: zhukova.kristina.sergeevna@yandex.ru

Abstract. Objectives. The aim of the study is to carry out a parametric analysis of the stress state of an anisotropic rock massif on the contours of the workings of a system of three parallel circular tunnels without lining due to the mass of the massif, for various ratios of the elastic characteristics of the rock massif in orthogonal directions, and at different distances del transverse isotropic medium. **Method.** The calculation of a system of three parallel tunnels without a large extension lining, laid in a strong transversely isotropic rock massif, is reduced to the problem of plane deformation of the theory of elasticity for a transversely isotropic medium containing parallel workings. A model of a transversely isotropic medium (a special case of an anisotropic medium) is used, in which the rock massif in one plane has the characteristics of an isotropic medium (the isotropy plane), and in the perpendicular direction, characteristics different from the isotropic medium. The stress state was investigated by the finite element method using the ANSYS software package. The sizes and type of the finite element suitable for calculation on the basis of the solution in the program complex of the verification task were previously determined. The Kirsch problem was accepted as the verification problem. **Result.** The relative tangential stresses on the contours of three parallel tunnels were determined depending on the degree of anisotropy of the rock mass and depending on the distance between parallel tunnels. The influence of the distance between the tunnels on the stress state on the contours of three parallel tunnels was evaluated, depending on the degree of anisotropy. **Conclusion.** The results of a parametric analysis of the system of three parallel free-flow tunnels without lining, depending on the degree of anisotropy of the rock mass and the distance between the tunnels, show that the stress state is significantly affected by the degree of anisotropy of the elastic properties of the soil massif and the distance between the tunnels. When designing underground structures, it is necessary to take into account the anisotropy of the elastic properties of the soil mass. It is also necessary to determine in more detail the physical and mechanical properties of rocky soils and pay special attention to elastic characteristics. As studies have shown, taking into account transverse-isotropy and the distance between the tunnels leads to both an increase and a decrease in tangential stresses on the contours of parallel tunnels. At some ratios of elastic characteristics in orthogonal directions, regardless of the distance between the tunnels, there are no tensile stresses on the contours of the tunnels, which favorably affects the operation of the hydraulic tunnel.

Keywords: deformation modulus, Poisson's ratio, transversely isotropic medium, system of three parallel tunnels, theory of elasticity

Введение. Одними из основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения, являются гидротехнические туннели. При расходах воды более 500 м³/с, а также неблагоприятных инженерно-геологических условиях, целесообразна проходка двух и более туннелей. Как правило, туннели прокладываются параллельно в одной горизонтальной плоскости.

Безнапорные, а также напорные гидротехнические туннели при глубине их заложения не менее половины величины внутреннего напора воды, проходящие в крепких, слабо трещиноватых скальных неразрываемых грунтах могут возводиться без обделки. Возведение гидротехнических туннелей без обделки сокращает сроки строительства на 10-15% и снижает их стоимость на 20-30%, по сравнению с возведением туннелей с несущей обделкой. Согласно существующим нормам [1], массивы скальных грунтов следует считать анизотропными при коэф-

фициенте анизотропии более 1,5. При этом в нормах [2] указано, что для туннелей, располагаемых в анизотропных грунтах с отношением модулей деформации в разных направлениях более 1,4, расчеты необходимо выполнять с учетом анизотропии. Наиболее распространенный тип скального грунта – осадочная горная порода, особенность которой – слоистость – чередование слоев, которые образуются при периодическом накоплении осадков. Также, любой тип скального грунта может быть пронизан горизонтальными трещинами. Вышеизложенные требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Постановка задачи. В работе проводится параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального массива на контурах системы трех параллельных туннелей круговой формы без обделки, от собственного веса массива, в зависимости от степени анизотропии и расстояния между туннелями. Проводится оценка влияния расстояния между туннелями на напряженное состояние на контурах трех параллельных выработок, в зависимости от степени анизотропии.

Методы исследования. Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений [10], [11], [15], [17].

Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3], [8], [12], что затрудняет применение этой модели на практике. Широкое распространение получила модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой грунт в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а в перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками [6], [7] (рис. 1).

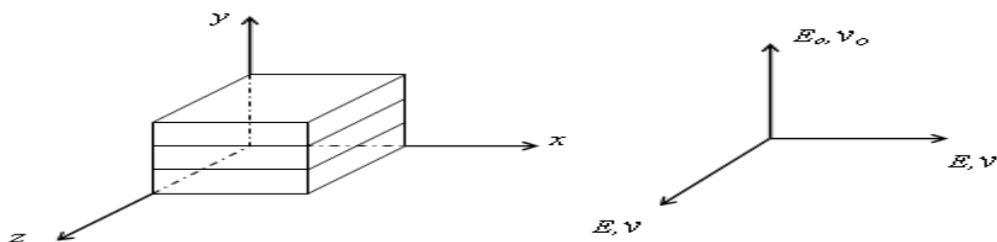


Рис. 1. Модель трансверсально-изотропной среды
Fig. 1. Model of a transversely isotropic medium

где: $E=E_x=E_z$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии; $E_o=E_y$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении, нормальном к плоскости изотропии; $\nu=\nu_{zx}=\nu_{xz}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии; $\nu_o=\nu_{xy}=\nu_{zy}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости нормальной к плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии; $G=G_{xz}$ – модуль сдвига в плоскости изотропии (ZOX) определяемый по известной зависимости (1), $G_o=G_{xy}=G_{yz}$ – модуль сдвига в любой плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии (ZOY), который можно определить по формуле К. Вольфа (2) [3]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \quad (1)$$

$$G_o = \frac{E \cdot E_o}{E + E_o (1 + 2\nu_o)} \cdot \quad (2)$$

Параметрический анализ выполнен методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS [14]. Предварительно были определены размер и тип элемента, пригодного для расчета по результатам решения верификационной задачи. В качестве верификационной задачи была рассмотрена упругая изотропная среда, подверженная сжатию и содержащая круглую выработку. Для такой задачи имеется точное аналитическое решение Кирша

[3]. Результаты расчетов с использованием программного комплекса ANSYS показали хорошее соответствие точному аналитическому решению (погрешность менее 1%).

В качестве расчетной схемы, моделирующей систему трех безнапорных гидротехнических туннелей глубокого заложения круговой формы без обделки, проложенных в трансверсально-изотропном скальном грунте с различными отношениями упругих характеристик в ортогональных направлениях, была принята бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, содержащая три параллельные выработки круговой формы, находящаяся в условиях плоской деформации [5], [13].

В качестве краевых условий на значительном удалении от выработок, рассматривалась вертикальная равномерно распределенная нагрузка сжатия, приложенная к горизонтальной границе расчетной области, моделирующая собственный вес скального массива. Также, вследствие того что боковое расширение грунта невозможно [4], [16] на вертикальных границах расчетной области поставлены горизонтальные связи, препятствующие боковому расширению.

На рис.2 представлена расчетная схема системы трех параллельных туннелей с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии расчетной области с учетом трансверсальной изотропии скального массива.

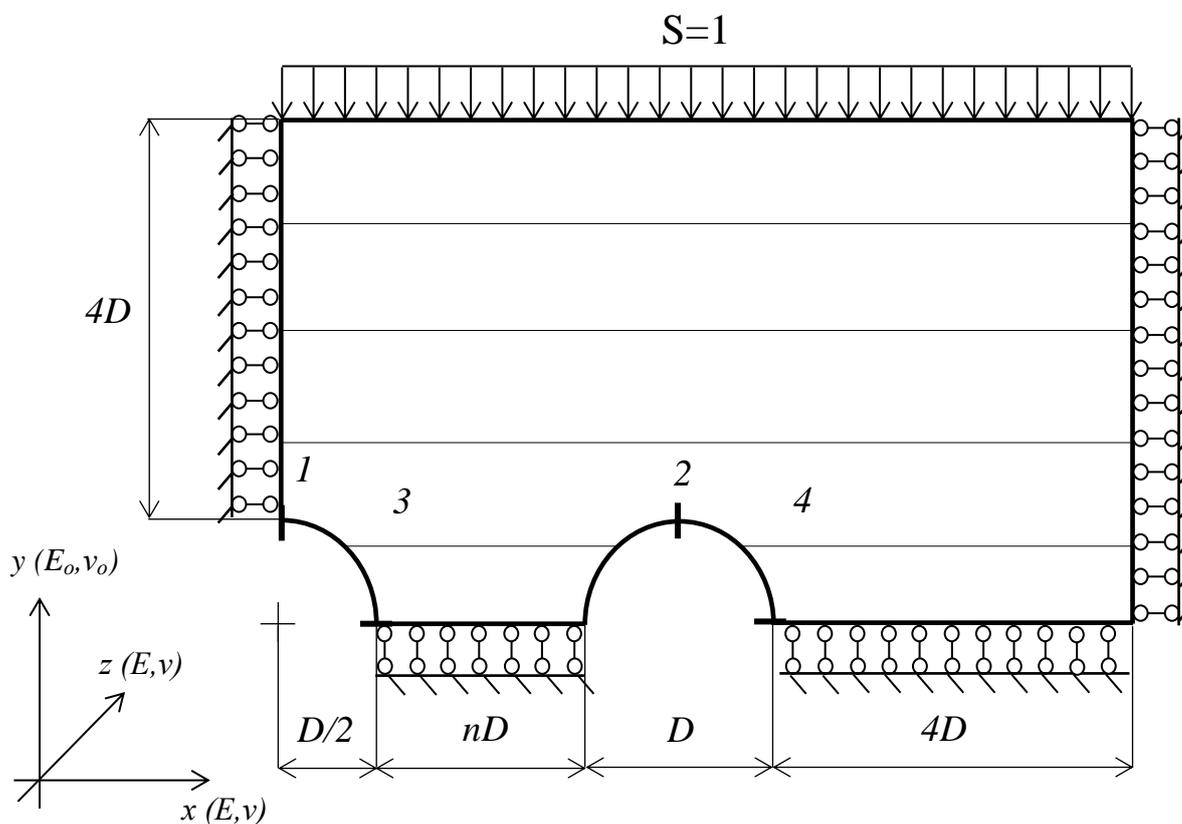


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на систему трех параллельных туннелей, по модели трансверсально-изотропной среды с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии расчетной области. (D – диаметр туннеля, nD – расстояние между туннелями)

Fig. 2. The design scheme that simulates the ground weight of the soil on the system of three parallel tunnels, according to the model of a transversely isotropic medium, taking into account the vertical and horizontal symmetry of the computational region. (D is the diameter of the tunnel, nD is the distance between the tunnels)

Обсуждение результатов. В процессе расчета задавались различные отношения упругих характеристик скального массива в ортогональных направлениях (отношения модулей деформаций E/E_0 и отношения коэффициентов Пуассона ν_0/ν в диапазоне от 1 до 3) и задавались

различные расстояния между туннелями $nD = (1;2;3;4;5;6)D$. Коэффициент Пуассона в плоскости изотропии скального массива был задан $\nu=0.1$, что соответствует крепкой скале.

Рассмотрим результаты расчета на единичную нагрузку от собственного веса скального массива на систему трех параллельных безнапорных туннелей без обделки, проложенных в трансверсально-изотропном скальном грунте. Зная относительные тангенциальные напряжения на контурах выработок от единичного воздействия можно определить истинные напряжения, умножив относительные тангенциальные напряжения на реальную величину нагрузки.

Относительные тангенциальные напряжения определялись в сечениях 1, 3 для центрального туннеля и в сечениях 2 и 4 для крайних туннелей, то есть в сечениях, где локализуются максимальные растягивающие тангенциальные напряжения (сечения 1 и 2), а в случае их отсутствия, максимальные сжимающие тангенциальные напряжения (сечения 3 и 4). Сечения представлены на рис. 2.

Таблица 1. Максимальные относительные тангенциальные растягивающие напряжения на контуре системы трех параллельных туннелей без обделки от собственного веса трансверсально-изотропного скального массива, в зависимости от отношения упругих характеристик в ортогональных направлениях и расстояния между туннелями
Table 1. Maximum relative tangential tensile stresses on the contour of a system of three parallel tunnels without lining the transversely isotropic rock mass from their own weight, depending on the ratio of the elastic characteristics in orthogonal directions and the distance between the tunnels

ν_0/ν	$n=1$						$n=2$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	1	0,538	0,661	0,755	0,831	0,897	0,564	0,696	0,794	0,872	0,937
	2	0,558	0,690	0,792	0,875	0,945	0,584	0,721	0,826	0,912	0,984
1,5	1	0,404	0,510	0,589	0,650	0,701	0,416	0,529	0,611	0,671	0,719
	2	0,412	0,525	0,609	0,673	0,725	0,429	0,546	0,633	0,699	0,752
2	1	0,267	0,357	0,419	0,463	0,486	0,266	0,369	0,423	0,465	0,493
	2	0,263	0,357	0,421	0,466	0,498	0,272	0,360	0,435	0,480	0,512
2,5	1	0,129	0,201	0,245	0,270	0,283	0,115	0,188	0,230	0,252	0,259
	2	0,114	0,186	0,230	0,253	0,259	0,115	0,189	0,232	0,255	0,263
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$n=3$						$n=4$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	1	0,590	0,734	0,844	0,932	1,006	0,609	0,760	0,878	0,974	1,054
	2	0,611	0,756	0,869	0,961	1,038	0,631	0,783	0,901	0,998	1,081
1,5	1	0,434	0,558	0,649	0,718	0,772	0,448	0,579	0,676	0,751	0,811
	2	0,451	0,576	0,668	0,739	0,796	0,468	0,598	0,695	0,771	0,832
2	1	0,277	0,379	0,449	0,497	0,530	0,287	0,394	0,469	0,521	0,558
	2	0,290	0,392	0,462	0,511	0,546	0,304	0,411	0,485	0,537	0,574
2,5	1	0,118	0,198	0,245	0,269	0,278	0,124	0,207	0,257	0,284	0,295
	2	0,127	0,206	0,252	0,277	0,286	0,138	0,220	0,269	0,296	0,307
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$n=5$						$n=6$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	1	0,627	0,782	0,904	1,004	1,09	0,644	0,802	0,927	1,031	1,119
	2	0,646	0,802	0,924	1,026	1,112	0,657	0,816	0,942	1,046	1,135
1,5	1	0,464	0,597	0,697	0,776	0,84	0,479	0,614	0,717	0,798	0,865
	2	0,481	0,615	0,715	0,794	0,859	0,491	0,627	0,730	0,812	0,878
2	1	0,299	0,409	0,486	0,541	0,580	0,313	0,424	0,502	0,559	0,600
	2	0,314	0,424	0,501	0,556	0,595	0,323	0,435	0,514	0,571	0,612
2,5	1	0,133	0,218	0,269	0,298	0,311	0,144	0,23	0,283	0,313	0,326
	2	0,147	0,231	0,283	0,311	0,323	0,153	0,24	0,293	0,323	0,336
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения наибольших относительных растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений в сечениях 1 и 3 (центральный туннель) и в сечениях 2 и 4 (крайние туннели) системы трех параллельных туннелей, в зависимости от отношений упругих характеристик скального массива в ортогональных направлениях и от расстояния между туннелями соответственно.

Из табл.1 видно, что для всего диапазона изменения отношений модулей деформации E/E_0 и при отношениях коэффициентов Пуассона в диапазоне от 1 до 2,5 в сечении 1 (центральный туннель) и в сечении 2 (крайние туннели) возникают растягивающие напряжения, которые увеличиваются при увеличении отношений модулей деформации, и уменьшаются, при увеличении отношений коэффициентов Пуассона, по сравнению с напряжениями в случае изотропии ($E/E_0=1, \nu/\nu=1$).

Таблица 2. Максимальные относительные тангенциальные сжимающие напряжения на контуре системы трех параллельных туннелей без отделки от собственного веса трансверсально-изотропного скального массива, в зависимости от отношения упругих характеристик в ортогональных направлениях и расстояния между туннелями.

Table 2. Maximum relative tangential compressive stresses on the contour of a system of three parallel tunnels without lining their own weight trans-versal-isotropic rock mass, depending on the ratio of elastic characteristics in orthogonal directions and the distance between the tunnels.

ν_0/ν	$n=1$						$n=2$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	3	-3,17	-2,97	-2,85	-2,78	-2,73	-3,01	-2,83	-2,71	-2,64	-2,58
	4	-3,05	-2,87	-2,76	-2,69	-2,64	-2,95	-2,78	-2,67	-2,60	-2,55
1,5	3	-3,15	-2,96	-2,85	-2,78	-2,73	-2,98	-2,80	-2,70	-2,63	-2,58
	4	-3,01	-2,84	-2,74	-2,67	-2,63	-2,91	-2,74	-2,65	-2,58	-2,54
2	3	-3,13	-2,95	-2,85	-2,79	-2,75	-2,94	-2,78	-2,69	-2,63	-2,59
	4	-2,97	-2,81	-2,72	-2,67	-2,63	-2,87	-2,72	-2,63	-2,57	-2,54
2,5	3	-3,12	-2,95	-2,87	-2,82	-2,79	-2,91	-2,77	-2,68	-2,64	-2,61
	4	-2,94	-2,79	-2,72	-2,67	-2,64	-2,83	-2,69	-2,62	-2,57	-2,55
3	3	-3,11	-2,96	-2,89	-2,86	-2,84	-2,89	-2,76	-2,69	-2,66	-2,64
	4	-2,91	-2,78	-2,71	-2,68	-2,67	-2,80	-2,68	-2,61	-2,58	-2,57
	$n=3$						$n=4$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	3	-2,95	-2,78	-2,68	-2,60	-2,55	-2,92	-2,75	-2,65	-2,58	-2,53
	4	-2,92	-2,75	-2,65	-2,58	-2,53	-2,92	-2,74	-2,64	-2,57	-2,52
1,5	3	-2,91	-2,75	-2,65	-2,59	-2,54	-2,88	-2,72	-2,63	-2,57	-2,52
	4	-2,88	-2,72	-2,61	-2,56	-2,51	-2,87	-2,71	-2,61	-2,55	-2,50
2	3	-2,87	-2,72	-2,64	-2,58	-2,54	-2,84	-2,69	-2,61	-2,55	-2,52
	4	-2,84	-2,69	-2,60	-2,55	-2,51	-2,83	-2,68	-2,59	-2,54	-2,50
2,5	3	-2,84	-2,70	-2,63	-2,58	-2,55	-2,80	-2,67	-2,60	-2,55	-2,52
	4	-2,80	-2,66	-2,59	-2,54	-2,52	-2,79	-2,65	-2,58	-2,53	-2,50
3	3	-2,81	-2,69	-2,62	-2,59	-2,58	-2,77	-2,65	-2,59	-2,56	-2,55
	4	-2,76	-2,64	-2,58	-2,55	-2,54	-2,75	-2,63	-2,57	-2,54	-2,52
	$n=5$						$n=6$				
	E/E_0										
	сечение	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	3	-2,91	-2,74	-2,64	-2,57	-2,52	-2,91	-2,74	-2,64	-2,57	-2,52
	4	-2,91	-2,74	-2,64	-2,57	-2,52	-2,92	-2,74	-2,64	-2,57	-2,52
1,5	3	-2,87	-2,70	-2,62	-2,55	-2,51	-2,87	-2,70	-2,61	-2,55	-2,50
	4	-2,87	-2,70	-2,61	-2,55	-2,50	-2,87	-2,71	-2,61	-2,55	-2,50
2	3	-2,83	-2,68	-2,59	-2,54	-2,50	-2,82	-2,67	-2,59	-2,53	-2,50
	4	-2,83	-2,67	-2,59	-2,53	-2,49	-2,83	-2,67	-2,59	-2,53	-2,49
2,5	3	-2,78	-2,65	-2,58	-2,54	-2,51	-2,78	-2,65	-2,57	-2,53	-2,50
	4	-2,78	-2,65	-2,57	-2,53	-2,50	-2,78	-2,65	-2,57	-2,53	-2,49
3	3	-2,76	-2,63	-2,57	-2,54	-2,53	-2,74	-2,62	-2,57	-2,54	-2,52
	4	-2,76	-2,63	-2,56	-2,53	-2,52	-2,75	-2,63	-2,56	-2,53	-2,51

Такая картина наблюдается при любых расстояниях между туннелями.

Например, при $E/E_0=2,5$, $\nu_0/\nu=1,5$ и $n=1$ значения максимальных растягивающих напряжений составляют 0,650 в сечении 1 (центральный туннель) и 0,673 в сечении 2 (крайние туннели), что на 20% больше соответствующих напряжений 0,538 в сечении 1 и 0,558 в сечении 2 в случае изотропии при $E/E_0=1$, $\nu_0/\nu=1$ и $n=1$. При $E/E_0=3$, $\nu_0/\nu=2,5$ и $n=3$ значения максимальных растягивающих напряжений составляют 0,278 в сечении 1 (центральный туннель) и 0,286 в сечении 2 (крайние туннели), что в 2,1 раза меньше соответствующих напряжений 0,590 в сечении 1 и 0,611 в сечении 2 в случае изотропии при $E/E_0=1$, $\nu_0/\nu=1$ и $n=3$.

При отношении коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu = 3$ и во всем диапазоне изменения отношений модулей деформации, независимо от расстояния между туннелями, на контурах выработок растягивающие напряжения не возникают.

Из табл.2 следует, что наибольшие сжимающие напряжения, которые возникают в сечении 3 (центральный туннель) и в сечении 4 (крайние туннели) уменьшаются как с увеличением отношений модулей деформации, так и с увеличением отношений коэффициентов Пуассона, при любых расстояниях между туннелями.

Например, при $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=1,5$ и $n=2$ значения максимальных сжимающих напряжений составляют -2,80 в сечении 3 (центральный туннель) и -2,74 в сечении 4 (крайние туннели), что на 8% меньше соответствующих напряжений -3,01 в сечении 3 и -2,95 в сечении 4 в случае изотропии при $E/E_0=1$, $\nu_0/\nu=1$ и $n=2$. При $E/E_0=3$, $\nu_0/\nu=2,5$ и $n=4$ значения максимальных сжимающих напряжений составляют -2,52 в сечении 3 (центральный туннель) и -2,50 в сечении 4 (крайние туннели), что на 16% и 17% меньше соответствующих напряжений -2,92 в сечении 3 и -2,92 в сечении 4 в случае изотропии при $E/E_0=1$, $\nu_0/\nu=1$ и $n=4$.

Как показали результаты параметрического анализа, значительные относительные тангенциальные растягивающие напряжения, которые могут возникать на контурах выработок при некоторых отношениях упругих характеристик, возрастают с увеличением расстояния между выработками.

Если растягивающие напряжения малы (в 20 и более раз меньше сжимающих напряжений на контурах) то определяющую роль играют относительные тангенциальные сжимающие напряжения, которые уменьшаются с ростом расстояния между выработками.

Следует также отметить, что при любых расстояниях между выработками можно найти такие отношения упругих характеристик, при которых на контурах системы трех параллельных выработок растягивающие напряжения не возникают, что благоприятным образом отражается на работе туннелей без обделки.

Вывод. Проведенный параметрический анализ показал, что напряженное состояние на контурах выработок существенно зависит от отношений упругих характеристик скального массива и от расстояния между туннелями.

Как видно из расчетов, во всем диапазоне изменения отношений модулей деформаций, при отношениях коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu=1, 1.5, 2$ и при любых расстояниях между выработками, максимальные относительные тангенциальные растягивающие напряжения на контуре крайней выработки, больше чем растягивающие напряжения на контуре центральной.

При $\nu_0/\nu = 2.5$ наблюдается обратная картина – наибольшие относительные тангенциальные растягивающие напряжения возникают на контуре центральной выработки. При $\nu_0/\nu=3$ на контурах выработок относительные тангенциальные растягивающие напряжения не возникают.

Максимальные относительные тангенциальные сжимающие напряжения во всем диапазоне изменения отношений модулей деформаций и при отношениях коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu=1, 1.5, 2, 2.5$ возникают на контуре центральной выработки, а при отношении $\nu_0/\nu=3$, значения сжимающих напряжений на контурах центральной и крайней выработки практически не отличаются друг от друга при любых расстояниях между выработками.

Максимальные относительные тангенциальные растягивающие напряжения на контурах трех параллельных выработок, увеличиваются при увеличении отношений модулей деформации, и уменьшаются, при увеличении отношений коэффициентов Пуассона, по сравнению с напряжениями в случае изотропии при любом расстоянии между выработками.

Максимальные относительные тангенциальные сжимающие напряжения, уменьшаются как с увеличением отношений модулей деформации, так и с увеличением отношений коэффициентов Пуассона, при любых расстояниях между туннелями.

Растягивающие напряжения, которые могут возникать на контурах выработок при некоторых отношениях упругих характеристик, возрастают с увеличением расстояния между выработками. Если растягивающие напряжения малы, то определяющую роль играют относительные тангенциальные сжимающие напряжения, которые уменьшаются с ростом расстояния между выработками.

Следует также отметить, что при любых расстояниях между выработками можно найти такие отношения упругих характеристик, при которых на контурах системы трех параллельных выработок растягивающие напряжения не возникают, что благоприятным образом отражается на работе туннелей без обделки.

Библиографический список:

1. СНиП 2.02.02-85*. Основания гидротехнических сооружений: утв. Госстроем СССР 12.12.85[ред. 30.06.2003]. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 67 с.
2. СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические: утв. Госстроем СССР 14.11.84: взамен СН 238-73. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 28 с.
3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
5. Баутдинов Д.Т. Конечно-элементный анализ гидротехнических туннелей без обделки, проложенных в трансверсально-изотропных скальных грунтах. Дисс. канд. тех. наук. М.-2012. -175с.
6. Баутдинов Д.Т. Исследование напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения. //Приволжский научный журнал.- 2011.- № 3. - С. 93-98.
7. Фролов М.И., Баутдинов Д.Т., Боев Ю.А. Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений. М.: Институт СНГ, 2012. -392с. - с.365 - 388.
8. Фролов М.И. Теория упругости и упруго-пластичности в перемещениях. – М. Институт СНГ. -2012.-166с.
9. Д.П. Прочухан, С.А. Фрид, Л.К. Доманский. Скальные основания гидротехнических сооружений. – Л.: Стройиздат, 1971.-190с.
10. Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М. Напряженное состояние скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения с учетом анизотропии грунтовой среды. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2016.- № 4. – С. 144-152.
11. Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М. Конечно - элементный анализ напряженного состояния подземных гидротехнических сооружений с учетом анизотропии основания //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.- 2017. - № 5. - С. 56-61.
12. Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W., Zhou, Y.X., 2013. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. Tunnel. Underground Space Technol. 35, 227–234.
13. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
14. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
15. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure, Tehnički glasnik 9, 1(2015), 35-39.

16. Ayberk Kaya, Fikri Bulut, Selçuk Alemdag and Aytuna Sayin. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey, *Scientific Research and Essays* Vol. 6(31), pp. 6566-6583, 16 December, 2011. DOI: 10.5897/SRE11.1691.
17. Y. Zhou, J. Zhao. Assessment and planning of underground space use in Singapore, *Tunnelling and Underground Space Technology* 55, 3(2016) 249-256. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.018

References:

1. SNiP 2.02.02-85*. Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: utv. Gosstroyem SSSR 12.12.85[red. 30.06.2003]. – M.: Gosstroy SSSR,1985. – 67 s. [SNiP 2.02.02-85 *. The foundations of hydraulic structures: approved. State Construction Committee of the USSR 12.12.85 [ed. 30.06.2003]. - M. : Gosstroy USSR, 1985. - 67 s. (In Russ.)]
2. SNiP 2.06.09-84. Tunneli gidrotekhnicheskiye: utv. Gosstroyem SSSR 14.11.84: vzamen SN 238-73. – M.: Gosstroy SSSR,1985. – 28 s. [SNiP 2.06.09-84. Hydrotechnical tunnels: approved. State Construction Committee of the USSR 11/14/84: instead of SN 238-73. - M. : Gosstroy USSR, 1985. - 28 s. (In Russ.)]
3. Lekhnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela/ S.G. Lekhnitskiy. – M.: Nauka, 1977. – 416 s. [Lekhnitskiy S.G. Theory of elasticity of anisotropic body / S.G. Lekhnitskiy. - M. : Science, 1977. - 416 p. (In Russ.)]
4. Tsytoich N.A. Mekhanika gruntov / N.A. Tsytoich. – M.: Vyssh. shk, 1983. 288 s [Tsytoich N.A. Soil mechanics / N.A. Tsytoich. - M. : Higher. MK, 1983. 288 p. (In Russ.)]
5. Bautdinov D.T. Konechno-elementnyy analiz gidrotekhnicheskikh tunney bez obdelki, prolozhennykh v transversal'no-izotropnykh skal'nykh gruntakh. Diss. kand. tekhn. nauk. M.-2012. -175s. [Bautdinov D.T. Finite element analysis of hydraulic tunnels without lining, laid in transversely isotropic rocky soils. Diss. Cand. those. sciences. M.-2012. -175s(In Russ.)]
6. Bautdinov D.T. Issledovaniye napryazhennogo sostoyaniya transversal'no-izotropnogo skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya. //Privolzhskiy nauchnyy zhurnal.- 2011.- № 3. - S. 93-98. [Bautdinov D.T. Investigation of the stress state of transversely isotropic rock soil near the hydraulic tunnel of circular section shape. // Volga scientific journal .- 2011.- № 3. - p. 93-98. (In Russ.)]
7. Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boyev. YU.A. Sistemnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. M.: Institut SNG, 2012. -392s. - s.365 - 388. Frolov M.I., Bautdinov D.T., Fights. Yu.A. System analysis of the stress state of hydraulic structures. M. : CIS Institute, 2012. -392c. - p.365 - 388. (In Russ.)]
8. Frolov M.I. Teoriya uprugosti i uprugo-plastichnosti v peremeshcheniyakh. – M. Institut SNG. -2012.-166s. [Frolov M.I. The theory of elasticity and elastic-plasticity in displacements. - M. CIS Institute. -2012.-166c. (In Russ.)]
9. D.P. Prochukhan, S.A. Frid, L.K. Domanskiy. Skal'nyye osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. – L.: Stroyizdat, 1971.-190s. [D.P. Prochukhan, S.A. Fried, L.K. Domansky. Rocky foundations of hydraulic structures. - L. : Stroyizdat, 1971.-190s. (In Russ.)]
10. Bautdinov D.T., Dzhamaludinov M.M. Napryazhennoye sostoyaniye skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya s uchetom anizotropii gruntovoy sredy. // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.- 2016.- № 4. – S. 144-152. [Bautdinov D.T., Jamaludinov M.M. The stress state of the rocky soil near the hydraulic tunnel of circular sectional shape, taking into account the anisotropy of the soil environment. // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences .- 2016.- № 4. - p. 144-152. (In Russ.)]
11. Bautdinov D.T., Dzhamaludinov M.M. Konechno - elementnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya podzemnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s uchetom anizotropii osnovaniya //Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy.- 2017. - № 5. - S. 56-61. [Bautdinov D.T., Jamaludinov M.M. Of course - elemental analysis of the stress state of underground hydraulic structures taking into account the anisotropy of the base // Building mechanics of engineering structures and structures.- 2017. - № 5. - p. 56-61. (In Russ.)]
12. Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W., Zhou, Y.X., 2013. Assessment of the underground tunnel. *Tunnel. Underground Space Technol.* 35, 227–234.
13. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. *Tunnel. Underground Space Technol.* 32, 52–57.
14. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
15. Voytenko I.V. Influence of cohesion on the parameters of heterogeneous soil pressure, *Tekhnicheskii glasnik* 9, 1 (2015), 35-39.
16. Ayberk Kaya, Fikri Bulut, Selçuk Alemdag and Aytuna Sayin. An analysis of the requirements for a weak portal: A case study from Turkey, Vol. 6 (31), pp. 6566-6583, 16 December, 2011. DOI: 10.5897 / SRE11.1691.
17. Y. Zhou, J. Zhao. Assessment and planning of underground space use in Singapore, *Tunneling and Underground Space Technology* 55, 3 (2016) 249-256. DOI: 10.1016 / j.tust.2015.12.018

Сведения об авторах:

Сведения об авторах:

Баутдинов Дамир Тахирович – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Инженерные конструкции».

Джамалудинов Магомед Магомеднабиевич – ведущий инженер отдела капитального строительства.

Жукова Кристина Сергеевна – главный специалист.

Information about the authors:

Damir T. Bautdinov - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of «Engineering Design».

Magomed M. Djamaludinov – Leading engineer of Capital construction.

Kristina S. Zhukova–Chief Specialist.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.08.2018.

Принята в печать 23.11.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.08.2018.

Accepted for publication 23.11.2018.