

Для цитирования: Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М., Жукова К.С. Напряженное состояние обделки безнапорного гидротехнического туннеля круговой формы, проложенного в анизотропном скальном грунте. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):155-164. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

For citation: Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M., Zhukova K.S. Stressed condition of the wrapping without-drive hydrotechnical tunnel of the circular form, proposed in anisotropic rock ground. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):155-164. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

УДК 502/504 : 69.035.4 : 539.31

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ БЕЗНАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ, ПРОЛОЖЕННОГО В АНИЗОТРОПНОМ СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ

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

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

Резюме. Цель. Целью исследования является параметрический анализ напряженного состояния обделки безнапорного гидротехнического туннеля круговой формы сечения, и прилегающего анизотропного скального грунта от собственного веса грунтовой среды при различных отношениях упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях по модели трансверсально-изотропной среды. **Метод.** Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком трансверсально-изотропном скальном грунте, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Применена 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. Применен метод конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно определены размеры и тип конечного элемента, пригодного для расчета на основе решения в программном комплексе верификационной задачи, в качестве которой принята задача Кириша. **Результат.** Определены относительные тангенциальные напряжения на внешнем и внутреннем контуре обделки, которые позволяют провести армирование бетонной обделки при различных глубинах заложения туннеля. Определены тангенциальные напряжения в прилегающем скальном массиве, позволяющие оценивать прочность грунта на контуре обделки. **Вывод.** На напряженное состояние существенное влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств грунтового массива. При проектировании подземных сооружений необходимо учитывать анизотропию упругих свойств грунтового массива; детально определять физико-механические свойства скальных грунтов и особое внимание уделять упругим характеристикам. Учет трансверсально-изотропии ведет, как к увеличению, так и к уменьшению тангенциальных напряжений в обделке туннеля и в скальном грунте на контуре обделки. При некоторых отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях, в обделке и в грунте на контуре обделки, отсутствуют растягивающие напряжения, что благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Ключевые слова: модуль деформации, коэффициент Пуассона, трансверсально-изотропная среда, туннели, обделка, теория упругости

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESSED CONDITION OF THE WRAPPING WITHOUT-DRIVE
HYDROTECHNICAL TUNNEL OF THE CIRCULAR FORM, PROPOSED
IN ANISOTROPIC ROCK GROUND

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 a parametric analysis of the stress-free lining of a pressureless hydraulic tunnel of circular section, and adjacent anisotropic rock from its own weight of the ground medium at different ratios of the elastic characteristics of the ground medium in orthogonal directions using a transversely isotropic medium model. **Method.** The calculation of a large-length hydraulic tunnel laid in strong transversely isotropic rocky ground is reduced to the problem of plane deformation of the theory of elasticity for a transversely isotropic medium containing tunnel development. A model of a transversely isotropic medium (a special case of an anisotropic medium) was used, in which the ground in one plane possesses the characteristics of an isotropic medium (the isotropy plane), and in the perpendicular direction, characteristics different from the isotropic medium. The finite element method was used 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 outer and inner lining contour, which allow reinforcement of the concrete lining at different depths of the tunnel, are determined. The tangential stresses in the adjacent rock massif are determined, allowing, if necessary, to assess the strength of the soil on the lining contour. **Conclusion.** The results of the study showed that the degree of anisotropy of the elastic properties of the soil massif significantly affects the stress state. When designing underground structures, it is necessary to take into account the anisotropy of the elastic properties of the soil mass; define in detail the physicomechanical properties of rocky soils and pay special attention to elastic characteristics. Accounting for transversal-isotropy leads to both an increase and a decrease in tangential stresses in the lining of the tunnel and in the rocky soil on the lining contour. In some respects, the elastic characteristics in orthogonal directions, in the lining and in the soil on the lining contour, there are no tensile stresses, which favorably affects the operation of the hydraulic tunnel.

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

Введение. Одними из основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения, являются гидротехнические туннели.

Согласно существующим нормам [1], массивы скальных грунтов следует считать анизотропными при коэффициенте 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. Вышеизложенные требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Постановка задачи. В данной работе проводится параметрический анализ напряженного состояния обделки туннеля и трансверсально-изотропного скального грунта, находящегося на контуре обделки туннеля круговой формы сечения, от собственного веса трансверсально-изотропного скального грунта, в зависимости от отношений упругих характеристик в ортогональных направлениях.

Методы исследования. Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений [10, 14, 16]. Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3, 8, 11], 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 перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками [6, 7] (рис. 1).

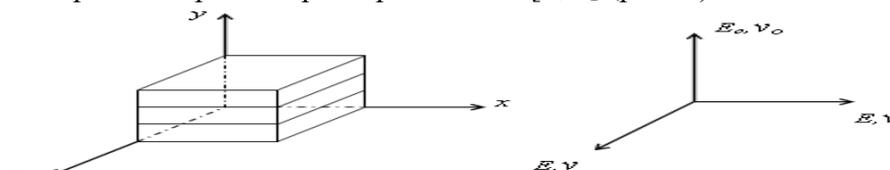


Рис. 1. Модель трансверсально-изотропной среды

Fig. 1. Model of 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;

$\nu_o=\nu_{xy}=\nu_{yz}$ – 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 (ZOX), 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 [13]. 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 безнапорный гидротехнический туннель глубокого заложения круговой формы сечения с обделкой, проложенный в трансверсально-изотропном скальном грунте с различными отношениями упругих характеристик в ортогональных направлениях, была принята бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, содержащая выработку круговой формы, находящаяся в условиях плоской деформации [5, 12].

В качестве краевых условий на значительном удалении от выработки, рассматривалась вертикальная равномерно распределенная нагрузка сжатия, приложенная к горизонтальной гра-

нице расчетной области, моделирующая собственный вес грунта над туннелем. Также, вследствие того, что боковое расширение грунта невозможно [4, 15] на вертикальных границах расчетной области поставлены горизонтальные связи, препятствующие боковому расширению. Размеры расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (критерий Фролова М.И.). Внутренний контур обделки свободен от воздействия, что соответствует безнапорному гидротехническому туннелю.

Обделка туннеля была принята выполненной из бетона марки В25 с модулем упругости E_b и с коэффициентом Пуассона $\nu_b = 0,2$. Толщина обделки была принята в долях от радиуса туннеля $t = 0,2r$. Отношение модуля упругости в плоскости изотропии скального массива к модулю упругости бетона было принято $E = 0,5E_b$ [9]. Также задавались коэффициенты Пуассона: $\nu = \nu_{xz} = \nu_{zx}$ в плоскости изотропии и $\nu_o = \nu_{xy} = \nu_{zy} = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ – в направлении нормальном к плоскости изотропии.

Расчетная схема с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии представлена на рис. 2.

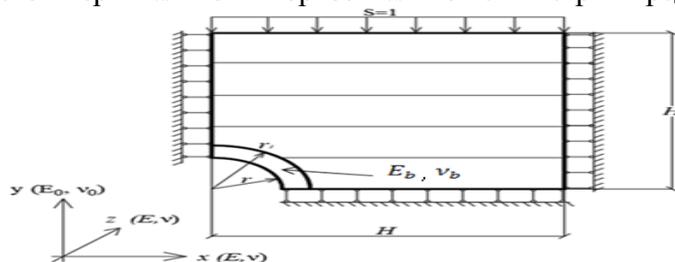


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды

Fig. 2. The design scheme that simulates the ground weight of the soil on the tunnel, according to the model of transversely isotropic medium

где, r – внутренний радиус бетонной обделки, r_1 – наружный радиус бетонной обделки, H – размер расчетной области ($H = 8r$).

Обсуждение результатов. Рассмотрим результаты расчета на единичную нагрузку от собственного веса грунта на безнапорный гидротехнический туннель с обделкой.

В процессе расчета задавались различные отношения упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях. Зная относительные тангенциальные напряжения в обделке и в прилегающем скальном грунте, можно определить истинное напряженное состояние, умножив относительные тангенциальные напряжения на реальную величину нагрузки. Относительные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контуре обделки, а также в трансверсально-изотропном скальном массиве на контуре обделки туннеля от собственного веса трансверсально-изотропного грунта с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии определялись в сечениях, представленных на рис. 3.

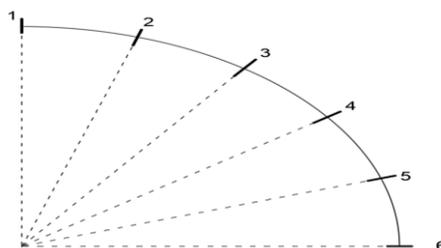


Рис. 3. Сечения, в которых определялись относительные тангенциальные напряжения

Fig. 3. Sections in which relative tangential stresses were determined

На рис. 4 и рис.5 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая изотропии соответственно. Из рис.4 и из рис.6 видно, что наибольшие относительные тангенциальные растягивающие напряжения на внутреннем контуре бетонной обделки в верхнем сечении при учете трансверсальной изотропии уменьшились более чем в 2 раза с 0,764 до 0,334 (табл. 1).

На рис. 6 и рис.7 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая

трансверсальной–изотропии при $E/E_0=1,5, \nu_0/\nu=2$, от собственного веса трансверсально-изотропного грунта.



Рис. 4. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса изотропного грунта

Fig. 4. Plot of relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining from its own weight of isotropic soil

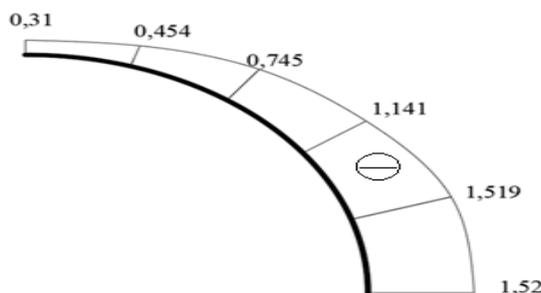


Рис. 5. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве на контуре обделки туннеля от собственного веса изотропного грунта

Fig. 5. Plot of relative tangential stresses in the rock mass on the tunnel lining contour due to its own weight of isotropic soil

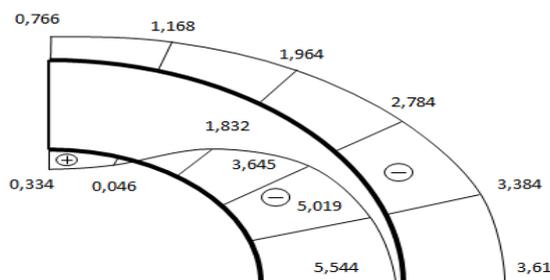


Рис. 6. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при: $\nu_0/\nu = 2$; $E/E_0 = 1,5$

Fig. 6. The plot of the relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining of its own weight transversely isotropic soil with: $\nu_0 / \nu = 2$; $E / E_0 = 1.5$

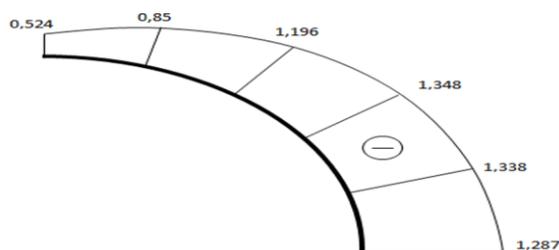


Рис. 7. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве от собственного веса трансверсально - изотропного грунта при: $\nu_0/\nu = 2$; $E/E_0 = 1,5$

Fig. 7. Plot of relative tangential stresses in the rock mass of its own weight transversely - isotropic soil with: $\nu_0 / \nu = 2$; $E / E_0 = 1.5$

Таблица 1. Относительные тангенциальные напряжения в скальном грунте на контуре обделки, в зависимости от отношений упругих характеристик в ортогональных направлениях
Table 1. Relative tangential stresses in rocky soil on the lining contour, depending on the relationship of elastic characteristics in orthogonal directions

ν_0/ν № сеч.	1	1,5	2	2,5	3
E/E ₀ =1					
1	-0,31	-0,363	-0,403	-0,452	-0,514
2	-0,454	-0,699	-0,723	-0,75	-0,78
3	-0,745	-1,134	-1,139	-1,146	-1,155
4	-1,141	-1,412	-1,412	-1,416	-1,423
5	-1,519	-1,523	-1,532	-1,545	-1,564
6	-1,52	-1,532	-1,548	-1,569	-1,597
E/E ₀ =1,5					
1	-0,446	-0,482	-0,524	-0,576	-0,638
2	-0,811	-0,831	-0,85	-0,871	-0,894
3	-1,198	-1,197	-1,196	-1,197	-1,199
4	-1,359	-1,352	-1,348	-1,349	-1,354
5	-1,327	-1,329	-1,338	-1,353	-1,376
6	-1,25	-1,265	-1,287	-1,316	-1,353
E/E ₀ =2					
1	-0,551	-0,589	-0,635	-0,689	-0,748
2	-0,908	-0,925	-0,941	-0,956	-0,972
3	-1,232	-1,228	-1,223	-1,22	-1,217
4	-1,319	-1,31	-1,305	-1,303	-1,307
5	-1,216	-1,217	-1,225	-1,239	-1,265
6	-1,081	-1,099	-1,125	-1,16	-1,205
E/E ₀ =2,5					
1	-0,647	-0,689	-0,738	-0,79	-0,845
2	-0,982	-0,996	-1,008	-1,018	-1,027
3	-1,251	-1,244	-1,237	-1,23	-1,224
4	-1,293	-1,282	-1,275	-1,273	-1,276
5	-1,152	-1,15	-1,155	-1,168	-1,195
6	-0,97	-0,988	-1,015	-1,053	-1,107
E/E ₀ =3					
1	-0,736	-0,781	-0,83	-0,881	-0,929
2	-1,038	-1,049	-1,058	-1,064	-1,066
3	-1,262	-1,253	-1,244	-1,235	-1,225
4	-1,276	-1,264	-1,255	-1,251	-1,255
5	-1,115	-1,11	-1,111	-1,122	-1,149
6	-0,906	-0,918	-0,94	-0,979	-1,039

Из табл.1 видно, что при увеличении отношений модулей деформации относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре туннеля в верхнем сечении возрастают, а в боковом сечении уменьшаются по сравнению со случаем изотропии. При увеличении отношений коэффициентов Пуассона относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре туннеля в верхнем сечении возрастают, а в боковом сечении растут незначительно по сравнению с напряжениями для случая изотропии. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения на внешнем контуре бетонной обделки возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,264 до 0,766. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре обделки туннеля (рис.7) в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии (рис.5) с 0,31 до 0,524. (табл. 2).

В боковом сечении в бетонной обделке и в грунте преобладают тангенциальные сжимающие напряжения. В бетонной обделке, с учетом трансверсальной изотропии, сжимающие напряжения возрастают по сравнению с напряжениями в случае изотропии - на внутреннем контуре с 4,799 до 5,544, на внешнем контуре с 3,134 до 3,61, а в грунте, наоборот, уменьшаются с 1,52 до 1,287. На рис. 8 и рис.9 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая трансверсальной изотропии при $E/E_0=2$, $\nu_0/\nu=1$, от собственного веса трансверсально-изотропного грунта соответственно.

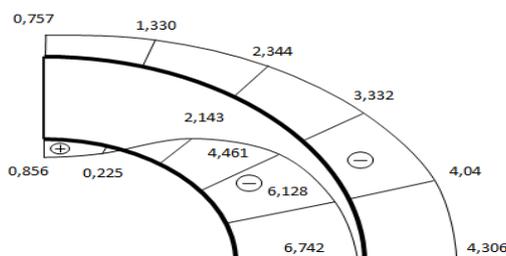


Рис. 8. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при $\nu_0/\nu=1$; $E/E_0=2$
Fig. 8. Plot of relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining from its own weight of transversely isotropic soil with $\nu_0 / \nu = 1$; $E / E_0 = 2$

Из рис.8 видно, что относительные растягивающие напряжения на внутреннем контуре бетонной обделки в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возросли по сравнению со случаем изотропии с 0,764 до 0,856. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения на внешнем контуре бетонной обделки возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,264 до 0,757.

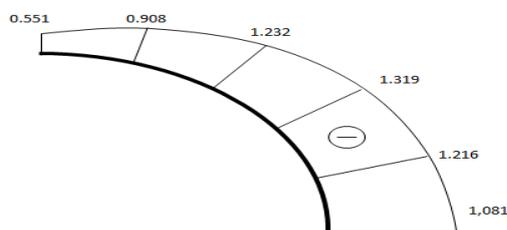


Рис. 9. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при $\nu_0/\nu=1$; $E/E_0=2$
Fig. 9. Plot of relative tangential stresses in the rock mass due to its own weight of transversely isotropic soil at $\nu_0 / \nu = 1$; $E / E_0 = 2$

Относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре обделки туннеля (рис.9) в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,31 до 0,551 (табл.2). В боковом сечении в бетонной обделке и в грунте, также преобладают тангенциальные сжимающие напряжения. В бетонной обделке, с учетом трансверсальной изотропии, эти сжимающие напряжения возрастают по сравнению с напряжениями в случае изотропии – на внутреннем контуре с 4,799 до 6,742, на внешнем контуре с 3,134 до 4,306, а в грунте, наоборот, уменьшаются с 1,52 до 1,081. В табл. 1 и табл. 2 представлены значения относительных тангенциальных напряжений от собственного веса трансверсально - изотропного грунта в сечениях, представленных на рис. 3, на внешнем и внутреннем контуре бетонной обделки, а также в трансверсально изотропном грунте на контуре обделки туннеля в зависимости от отношения упругих характеристик в ортогональных направлениях (рис.1).

Таблица 2. Относительные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки туннеля в зависимости от отношения упругих характеристик
Table 2. Relative tangential stresses on the inner and outer contour of the concrete lining of the tunnel depending on the ratio of elastic characteristics

№ сеч.	внутренний контур	внешний контур
--------	-------------------	----------------

	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
	E/E ₀ =1					E/E ₀ =1				
1	0,764	0,52	0,286	0,054	-0,191	-0,264	-0,369	-0,514	-0,657	-0,796
2	0,312	0,153	0,047	-0,378	-0,555	-0,642	-0,739	-0,835	-0,934	-1,033
3	-1,179	-1,27	-1,364	-1,45	-1,533	-1,394	-1,465	-1,504	-1,54	-1,573
4	-2,884	-2,87	-2,852	-2,82	-2,779	-2,26	-2,248	-2,23	-2,205	-2,175
5	-4,258	-4,16	-4,049	-3,92	-3,783	-2,89	-2,839	-2,776	-2,706	-2,629
6	-4,799	-4,669	-4,523	-4,363	-4,186	-3,135	-3,063	-2,983	-2,896	-2,801
	E/E ₀ =1,5					E/E ₀ =1,5				
1	0,826	0,581	0,334	0,089	-0,176	-0,484	-0,627	-0,766	-0,898	-1,025
2	0,269	0,134	0,046	-0,495	-0,67	-0,933	-1,082	-1,168	-1,251	-1,33
3	-1,686	-1,764	-1,832	-1,892	-1,944	-1,918	-1,945	-1,964	-1,975	-1,979
4	-3,745	-3,704	-3,645	-3,567	-3,472	-2,858	-2,827	-2,784	-2,731	-2,666
5	-5,303	-5,172	-5,019	-4,84	-4,639	-3,546	-3,471	-3,384	-3,284	-3,17
6	-5,894	-5,731	-5,544	-5,33	-5,092	-3,805	-3,714	-3,61	-3,493	-3,362
	E/E ₀ =2					E/E ₀ =2				
1	0,856	0,6	0,342	0,085	-0,199	-0,757	-0,893	-1,021	-1,139	-1,248
2	0,225	0,112	0,039	-0,622	-0,794	-1,33	-1,41	-1,482	-1,546	-1,601
3	-2,143	-2,202	-2,247	-2,276	-2,292	-2,344	-2,356	-2,354	-2,338	-2,308
4	-4,461	-4,389	-4,289	-4,163	-4,007	-3,332	-3,284	-3,218	-3,134	-3,031
5	-6,128	-5,389	-5,767	-5,536	-5,266	-4,04	-3,948	-3,837	-3,706	-3,554
6	-6,742	-6,546	-6,317	-6,05	-5,742	-4,306	-4,198	-4,071	-3,923	-3,753
	E/E ₀ =2,5					E/E ₀ =2,5				
1	0,864	0,599	0,33	0,063	-0,241	-1,027	-1,154	-1,266	-1,366	-1,453
2	0,189	0,094	0,029	-0,747	-0,915	-1,649	-1,718	-1,773	-1,813	-1,841
3	-2,554	-2,594	-2,612	-2,608	-2,583	-2,716	-2,712	-2,687	-2,642	-2,576
4	-5,07	-4,967	-4,826	-4,647	-4,426	-3,721	-3,654	-3,564	-3,449	-3,307
5	-6,802	6,607	-6,366	-6,077	-5,736	-4,43	-4,322	-4,186	-4,025	-3,832
6	-7,426	-7,199	-6,926	-6,603	-6,222	-4,699	-4,574	-4,424	-4,244	-4,033
	E/E ₀ =3					E/E ₀ =3				
1	0,861	0,585	0,307	0,034	-0,295	-1,289	-1,402	-1,498	-1,575	-1,637
2	0,162	0,078	0,02	-0,864	-1,028	-1,952	-2,007	-2,041	-2,056	-2,051
3	-2,925	-2,944	-2,933	-2,893	-2,823	-3,044	-3,023	-2,974	-2,897	-2,792
4	-5,598	-5,464	-5,279	-5,044	-4,752	-4,044	-3,962	-3,847	-3,699	-3,515
5	-7,37	-7,142	-6,857	-6,508	-6,089	-4,749	-4,624	-4,466	-4,271	-4,035
6	-7,995	-7,737	-7,42	-7,037	-6,579	-5,015	-4,875	-4,701	-4,489	-4,235

Из табл. 2 видно, что относительные тангенциальные растягивающие напряжения на внутреннем контуре обделки в верхнем сечении при увеличении отношений модулей деформации возрастают, а при увеличении отношений коэффициентов Пуассона уменьшаются по сравнению со случаем изотропии. На внешнем контуре обделки в верхнем сечении относительные тангенциальные сжимающие напряжения возрастают как при увеличении отношений модулей деформаций, так и при увеличении отношений коэффициентов Пуассона. В боковом сечении от-

носительные тангенциальные сжимающие напряжения на *внешнем* и *внутреннем* контуре обделки возрастают при увеличении отношений модулей деформаций, и уменьшаются при увеличении отношений коэффициентов Пуассона.

Следует отметить, что можно найти такие отношения упругих характеристик, при которых в бетонной обделке на внешнем и внутреннем контуре возникают только относительные тангенциальные сжимающие напряжения, что благоприятным образом отражается на работе бетонной обделки и туннеля в целом.

Вывод. Результаты параметрического анализа напряженного состояния обделки безнапорного гидротехнического туннеля и прилегающего к внешнему контуру обделки скального массива показывают, что на напряженное состояние существенное влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств грунтового массива. При проектировании подземных сооружений необходимо учитывать анизотропию упругих свойств грунтового массива. Необходимо более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять упругим характеристикам. Как показали проведенные исследования, учет трансверсальной-изотропии ведет как к увеличению, так и к уменьшению тангенциальных напряжений в обделке туннеля и в скальном грунте на контуре обделки. При некоторых отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях, в обделке и в грунте на контуре обделки, отсутствуют растягивающие напряжения, что благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

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. 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.
12. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
13. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
14. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure, Tehnički glasnik 9, 1(2015), 35-39.
15. 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.
16. 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]. – М.: 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 p. (in Russ)]
- 2.SNiP 2.06.09-84. Tunneli gidrotekhnicheskkiye: utv. Gosstroyem SSSR 14.11.84: vzamen SN 238-73. – М.: 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 p. (in Russ)]
- 3.Lekhnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela/ S.G. Lekhnitskiy. – М.: Nauka, 1977. – 416 s. [Lekhnitsky S.G. Theory of elasticity of anisotropic body / S.G. Lekhnitsky. - M.: Science, 1977. - 416 p. (in Russ)]

4. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov / N.A. Tsytovich. – M.: Vyssh. shk, 1983. 288 s. [Tsytovich N.A. Soil mechanics / N.A. Tsytovich. - 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. -175p. (in Russ)]
6. Bautdinov D.T. Issledovaniye napryazhennogo sostoyaniya transversal'no-izotropnogo skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnyaya 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. - pp. 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.-166p. (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.-190p. (in Russ)]
10. Bautdinov D.T., Dzhamaaludinov M.M. Napryazhennoye sostoyaniye skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnyaya krugovoy formy secheniya s uchetom anizotropii gruntovoy sredy//Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye 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 Daghestan State Technical University. Technical Sciences .- 2016.- № 4. - pp. 144-152. (in Russ)]
11. 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.
12. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
13. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
14. Voytenko I.V. Influence of cohesion on the parameters of heterogeneous soil pressure, Tehnički glasnik 9, 1 (2015), 35-39.
15. 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 De-cember, 2011. DOI: 10.5897 / SRE11.1691.
16. 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:

Баудинов 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 14.07.2018.

Принята в печать 23.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.07.2018.

Accepted for publication 23.09.2018.