

Для цитирования: 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;43(4):144-152. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

For citation: Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M. Stressed state of rocky subsoil in the vicinity of a circular section hydraulic engineering tunnel taking into account the anisotropy of the ground medium. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43 (4):144-152. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 502/504 : 69.035.4 : 539.31

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

Баутдинов Д.Т.¹, Джамалудинов М.М.²

¹Российский государственный аграрный университет-университет
природообустройства МСХА им. К.А. Тимирязева,

¹127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19,

²Республика Дагестан «Экосервис»,

²367000, г. Махачкала, ул. Абубакарова, 7,

¹e-mail: damir.ttl@mail.ru, ²e-mail: djamaludinov86@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью исследования является параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения от собственного веса грунтовой среды при различных отношениях упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях и при различных углах наклона плоскости изотропии. **Метод.** 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. Угол наклона плоскости изотропии моделирует наклонное залегание слоев грунта. **Результат.** Определены тангенциальные напряжения на контуре выработки, позволяющие оценивать прочность грунтовой среды при различных глубинах заложения. 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. Так как решение такой задачи невозможно аналитическими методами, анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип конечного элемента, пригодного для расчета на основе решения верификационной задачи. В качестве верификационной задачи была принята задача Кирша. **Вывод.** При проектировании подземных сооружений требуется более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять к упругим характеристикам. Отсутствие растягивающих напряжений в верхнем сечении выработки при некоторых отношениях модулей деформации и коэффициентов Пуассона благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля. При угле наклона пластов менее 30° , его влияние на напряженное состояние незначительно и расчеты можно проводить, не учитывая угол наклона, но с учетом анизотропии упругих свойств.

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

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESSED STATE OF ROCKY SUBSOIL IN THE VICINITY OF A CIRCULAR SECTION HYDRAULIC ENGINEERING TUNNEL TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPY OF THE GROUND MEDIUM

*Damir T. Bautdinov*¹, *Magomed M. Dzhamaludinov*².

¹Russian State Agrarian University –

Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

¹19 Pryanishnikova Str., Moscow 127550, Russia,

²Republic of Dagestan «Ekoservis»,

²73 Abubakarov Str., Makhachkala 367000, Russia,

¹e-mail: damir.ttl@mail.ru, ²e-mail: djamaludinov86@mail.ru

Abstract: Objectives. The aim of this study consists in a parametric analysis of the stress state of transversely isotropic rocky ground in the vicinity of a circular cross-sectional hydraulic tunnel taking into account the dead load of the subsoil medium under various relations of the elastic characteristics of the subsoil environment in orthogonal directions and at different angles of inclination of the plane of isotropy. **Methods.** A transversely isotropic medium model (a special case of an anisotropic medium) is applied, in which the subsoil in one plane has the characteristics of an isotropic medium (isotropic plane) but in a perpendicular direction – in contradistinction to the characteristics of an isotropic medium. The angle of isotropic planar inclination models the oblique bedding of subsoil layers. **Results.** The determination of tangential stresses on the contour generation allows the strength of the subsoil medium to be estimated at different depths of emplacement. The calculation of extensive hydraulic engineering tunnels, constructed in strong, transversely isotropic rocky ground, is reduced to a problem of plane strain elasticity theory for a transversely isotropic medium surrounding the tunnel construction. Since the solution of this problem cannot be achieved using analytical methods, the analysis of the stress state was carried out by finite element method using the ANSYS software complex. The type and size of the finite element appropriate for the calculation were pre-identified based on solutions to the task of verification. For the verifactory task, the Kirsch problem was adopted. **Conclusion.** When designing underground structures, it is necessary to determine the physical and mechanical properties of rocky soils in greater detail and to pay special attention to the elastic characteristics. The absence of tensile stresses in the upper section of development with some relations of the moduli of deformation and Poisson's ratios benefit the work of hydraulic tunnelling. At a bedding angle of at least 30°, its impact on the state of stress is insignificant and calculations can be carried out without taking the angle into account, but instead considering the anisotropy of the elastic properties.

Keywords: module deformation, Poisson's ratio, transversely isotropic medium, theory of elasticity

Введение. Одними из основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения, несмотря на сложность возведения, большие затраты и трудоемкость, являются гидротехнические туннели. Применение в скальных грунтах туннелей без обделки позволяет снизить затраты на 20-30%, а также сократить сроки строительства на 10-15% [7, 8]. Согласно существующим нормам [1], массивы скальных грунтов следует считать анизотропными при коэффициенте анизотропии более 1,5.

Под коэффициентом анизотропии понимается отношение большего значения характеристики к меньшему значению в двух заданных направлениях. 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 анизо-

тропии. Данные требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с весьма выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Нарушение целостности грунтового массива, в частности, туннельная выработка, меняет напряженно-деформированное состояние (НДС) массива, что приводит к появлению в некоторых местах растягивающих напряжений, а в некоторых случаях – значительных сжимающих напряжений [15]. Если эти напряжения будут превосходить расчетные сопротивления грунта на растяжение и сжатие, соответственно, то может произойти обрушение кровли выработки и выпучивание боковых стенок и днища туннеля [13, 14].

Нагрузки и воздействия на гидротехнические туннели подразделяются на постоянные и временные. Временные нагрузки, в свою очередь, разделяются на длительные, кратковременные и особые. К постоянным нагрузкам и воздействиям на туннели без отделки относится горное давление. К временным длительным нагрузкам относятся внутреннее давление (напор) воды в туннеле при нормальном подпорном уровне воды в водохранилище давление подземных вод.

К кратковременным нагрузкам относятся давление пульсации потока воды, внутреннее давление воды, возникающее от гидравлического удара при нормальной эксплуатации туннеля, давление от механизмов при производстве работ.

К особым нагрузкам и воздействиям относятся сейсмические и взрывные воздействия [9,10], внутреннее давление воды при форсированном подпорном уровне воды в водохранилище или от действия гидравлического удара при полном сбросе нагрузки, усилия, возникающие вследствие изменения температуры и ползучести грунтов.

Постановка задачи. Целью данной работы является проведение параметрического анализа напряженного состояния на контуре круглой выработки от собственного веса трансверсально-изотропного скального грунта с углом наклона плоскости изотропии α равном 15, 30 и 45 градусов, при различных упругих характеристиках в ортогональных направлениях. Угол наклона плоскости изотропии - α , моделирует наклонное залегание слоев скального грунта.

Методы исследования. Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений [12]. Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3, 8], что затрудняет применение этой модели на практике. При расчете гидротехнических туннелей 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](рис. 1).

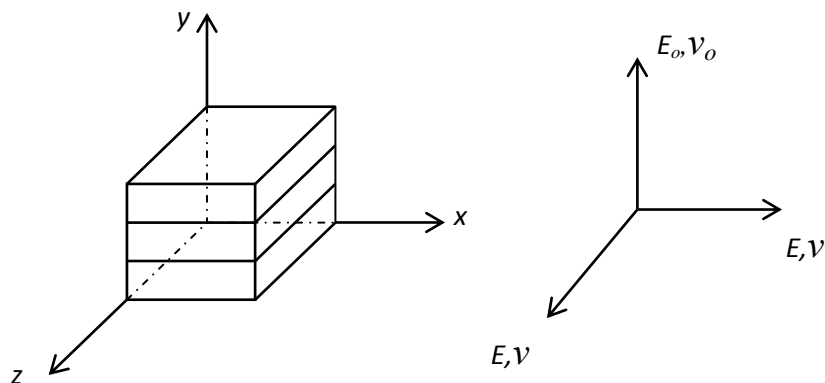


Рис.1. Модель трансверсально-изотропной среды

Fig.1. The 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 (ZOX), который можно определить по формуле К. Вольфа (2) [3]:

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

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

Параметрический анализ выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS [11]. Предварительно были определены размер и тип элемента, пригодного для расчета.

В качестве верификационной задачи была рассмотрена упругая изотропная среда, подверженная сжатию и содержащая круглую выработку. Для такой задачи имеется аналитическое решение Кирша [3]. Результаты расчетов с использованием программного комплекса ANSYS показали хорошее соответствие аналитическому решению (погрешность менее 1%).

В качестве расчетной схемы, моделирующей гидротехнический туннель без обделки круговой формы сечения со значительной глубиной заложения, проходящий в скальных грунтах с наклонным залеганием слоев, с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях, применялась бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, подверженная сжатию (P – статическая вертикальная равномерно распределенная нагрузка), содержащая выработку круговой формы, находящаяся в условиях плоской деформации [5]. При этом наклонный слой грунта моделируется изотропной средой. Так как, боковое расширение грунта невозможно [4], на вертикальных гранях расчетной области поставлены горизонтальные связи, препятствующие боковому расширению.

Размеры расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (критерий Фролова М.И.). Расчетная схема представлена на рис. 2.

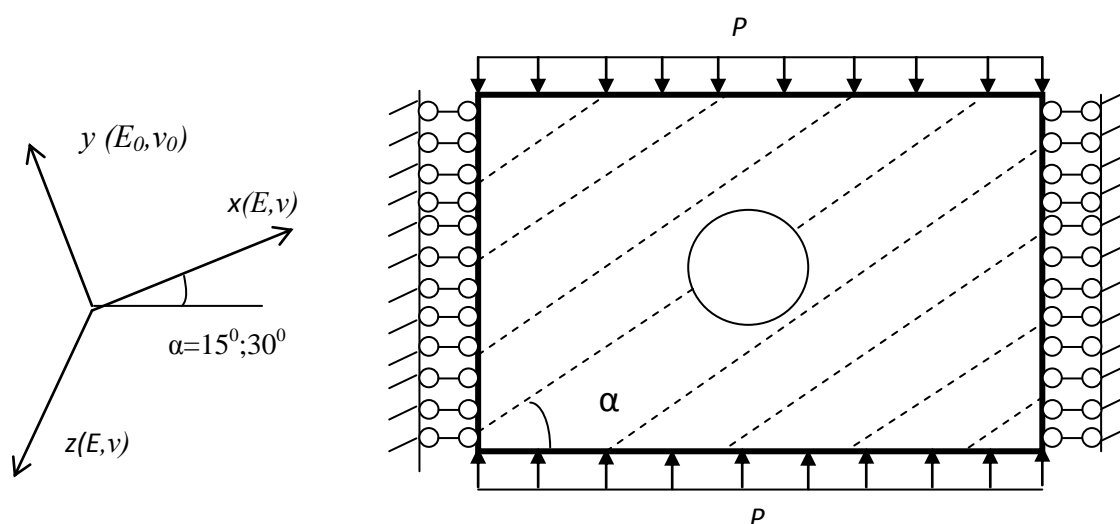


Рис.2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды

(α – угол наклона слоев грунта или плоскости изотропии)

Fig.2. The design scheme, which simulates the soil's own weight on the tunnel, according to the model of a transversally isotropic medium

(α is the angle of inclination of soil layers or the isotropy plane)

Обсуждение результатов. Рассмотрим результаты расчета на единичную нагрузку от собственного веса грунта на гидротехнический туннель. В процессе расчета задавались различные упругие характеристики в ортогональных направлениях. Также задавались углы наклона плоскости изотропии 15, 30 и 45 градусов.

На рис. 3 представлена эпюра относительных тангенциальных напряжений (η) по контуру выработки круговой формы для изотропной среды, которая позволит оценить влияние анизотропности свойств грунтового массива, а также угла наклона пластов скального грунта на напряженное состояние туннеля.

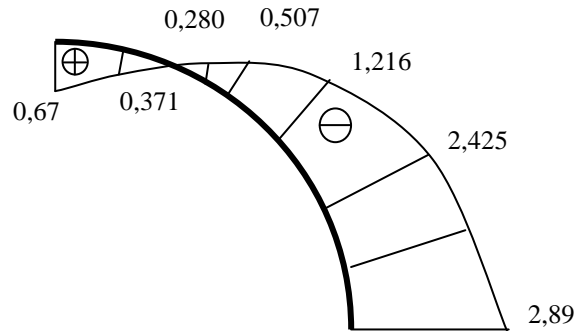


Рис. 3. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса грунта для изотропной среды при $\nu = 0,1$ с учетом симметрии

Fig. 3. Diagram of relative tangential stresses along the contour of a tunnel of circular cross-section from the self-weight of the soil for an isotropic medium at $\nu = 0,1$ with allowance for Symmetry

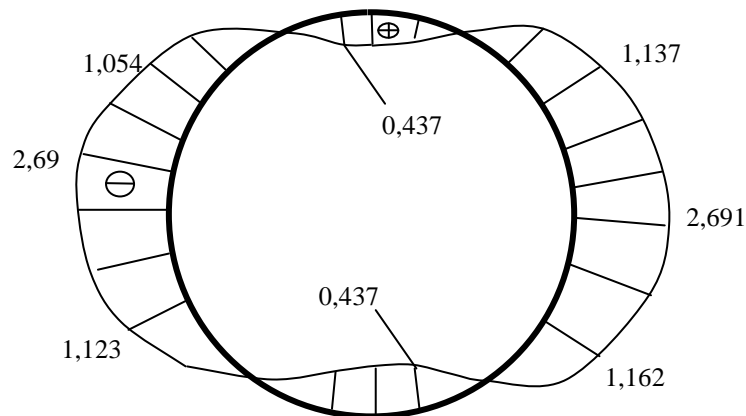


Рис.4. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса transversально-изотропного грунта при угле наклона плоскости изотропии 15° $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$

Fig. 4. Diagram of relative tangential stresses along the contour of a circular tunnel tunnel from the intrinsic weight of a transversally isotropic ground at an angle of inclination of the isotropy plane 15° $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$

На рис. 4 и 5 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений при $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$ для transversально-изотропной среды с углом наклона пластов 15° и 45° .

Из рис. 4 и 5 видно, что растягивающие и сжимающие напряжения на контуре выработки меньше чем в изотропной среде.

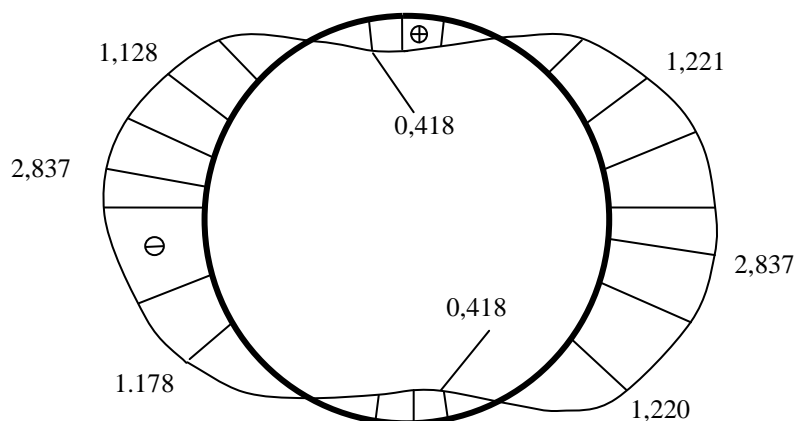


Рис.5. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при угле наклона плоскости изотропии $45^\circ E/E_0=1,5, \nu_0/\nu = 2$

Fig.5. The diagram of the relative tangential stresses along the contour of a circular tunnel from the intrinsic weight of a transversally isotropic ground at an inclination angle of the isotropy plane is $45^\circ E/E_0 = 1,5, \nu_0/\nu = 2$

В таблицах 1 и 2 приведены значения наибольших относительных растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений на контуре выработки при различных отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях в зависимости от угла наклона слоев скального грунта.

Таблица 1. Максимальные относительные растягивающие тангенциальные напряжения на контуре выработки круговой формы от собственного веса грунта в зависимости от отношений упругих характеристик и угла наклона слоев грунта (плоскости изотропии)

Table 1. Maximum relative tensile tangential stresses on the contour of working out of a circular shape from the self-weight of the soil, depending on the ratio of the elastic characteristics and the angle of inclination of the soil layers (the isotropy plane)

ν/ν_0	E/E_0									
	$\alpha=0^\circ$					$\alpha=15^\circ$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	0,67	0,827	0,961	1,072	1,167	0,67	0,817	0,948	1,061	1,161
1,5	0,491	0,635	0,745	0,832	0,903	0,491	0,63	0,741	0,835	0,913
2	0,32	0,439	0,524	0,585	0,630	0,32	0,437	0,527	0,595	0,647
2,5	0,149	0,241	0,298	0,331	0,346	0,146	0,24	0,304	0,343	0,364
3	0	0,039	0,067	0,070	0	0	0,039	0,073	0,080	0,063
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ν/ν_0	E/E_0									
	$\alpha=30^\circ$					$\alpha=45^\circ$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	0,67	0,785	0,897	0,999	1,09	0,67	0,731	0,801	0,865	0,923
1,5	0,491	0,612	0,717	0,807	0,885	0,491	0,58	0,655	0,719	0,772
2	0,318	0,431	0,523	0,595	0,650	0,32	0,418	0,494	0,551	0,594
2,5	0,146	0,242	0,314	0,362	0,388	0,146	0,245	0,316	0,361	0,386
3	0	0,044	0,092	0,109	0,099	0	0,059	0,12	0,146	0,145
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2. Максимальные относительные сжимающие тангенциальные напряжения на контуре выработки круговой формы от собственного веса грунта в зависимости от отношений упругих характеристик и угла наклона слоев грунта (плоскости изотропии)
Table 2. Maximum relative compressive tangential stresses on the contour of circular shape development from the intrinsic weight of the soil, depending on the ratio of the elastic characteristics and the angle of inclination of the soil layers (the isotropy plane)

ν_0/ν	E/E_0									
	$\alpha=0^0$					$\alpha=15^0$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	-2,890	-2,743	-2,639	-2,569	-2,518	-2,890	-2,77	-2,686	-2,63	-2,918
1,5	-2,870	-2,706	-2,610	-2,547	-2,501	-2,869	-2,73	-2,65	-2,597	-2,869
2	-2,825	-2,673	-2,587	-2,532	-2,493	-2,821	-2,691	-2,617	-2,568	-2,821
2,5	-2,782	-2,645	-2,570	-2,525	-2,496	-2,774	-2,655	-2,587	-2,542	-2,774
3	-2,742	-2,621	-2,560	-2,528	-2,513	-2,728	-2,621	-2,561	-2,524	-2,728
3,5	-2,704	-2,602	-2,558	-2,544	-2,677	-2,683	-2,59	-2,542	-2,517	-2,683
ν_0/ν	E/E_0									
	$\alpha=30^0$					$\alpha=45^0$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	-2,890	-2,847	-2,816	-2,802	-2,796	-2,890	-2,953	-2,999	-3,046	-3,092
1,5	-2,865	-2,799	-2,767	-2,75	-2,739	-2,869	-2,898	-2,941	-2,982	-3,021
2	-2,811	-2,748	-2,713	-2,69	-2,671	-2,821	-2,837	-2,872	-2,904	-2,931
2,5	-2,755	-2,693	-2,654	-2,622	-2,592	-2,774	-2,768	-2,793	-2,811	-2,821
3	-2,697	-2,636	-2,591	-2,549	-2,507	-2,728	-2,692	-2,702	-2,7	-2,689
3,5	-2,636	-2,577	-2,525	-2,476	-2,43	-2,683	-2,608	-2,598	-2,571	-2,531

Из таблицы 1 видно, что при увеличении отношений модулей деформации растягивающие напряжения возрастают по сравнению с изотропной средой, а при увеличении отношений коэффициентов Пуассона уменьшаются. Также при некоторых отношениях упругих характеристик растягивающие напряжения на контуре выработки равны нулю. Также можно заметить, что при увеличении угла наклона плоскости изотропии относительные тангенциальные растягивающие напряжения уменьшаются по сравнению со случаем, когда угол наклона плоскости изотропии равен нулю.

Как видно из таблицы 2, относительные сжимающие напряжения при увеличении отношений модулей деформации сначала уменьшаются по сравнению с изотропной средой, а затем, начиная с некоторого момента, начинают возрастать. Такая же картина наблюдается при увеличении отношений коэффициентов Пуассона. Также можно заметить, что при увеличении угла наклона плоскости изотропии относительные тангенциальные сжимающие напряжения увеличиваются по сравнению со случаем, когда угол наклона плоскости изотропии равен нулю.

При дальнейшем увеличении отношений модулей деформации (при заданном значении коэффициента Пуассона) растягивающие напряжения в верхнем сечении выработки увеличиваются, а сжимающие в боковом сечении, продолжают уменьшаться. С некоторого значения отношения модулей деформации и коэффициентов Пуассона растягивающие напряжения вовсе перестают возникать на контуре выработки.

Как видно из таблиц 1 и 2, зависимость тангенциальных напряжений от отношений упругих характеристик в верхнем и боковом сечении выработки практически близка к линейной. Следовательно, при определении относительных тангенциальных напряжений для отношений упругих характеристик, не представленных в таблицах, достаточно линейной интерполяции.

Вывод. Результаты параметрического анализа напряженного состояния грунта в окрестности выработки гидротехнического туннеля круговой формы поперечного сечения показывают, что на напряженное состояние непосредственное влияние оказывает степень

анизотропии упругих свойств. При проектировании подземных сооружений требуется более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять упругим характеристикам.

Отсутствие растягивающих напряжений в верхнем сечении выработки при некоторых отношениях модулей деформации и коэффициентов Пуассона благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Из таблиц 1 и 2 видно, что при угле наклона пластов менее 30^0 , его влияние на напряженное состояние незначительно, и расчеты можно проводить, не учитывая угол наклона, но с учетом анизотропии упругих свойств.

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. 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.
10. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
11. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
12. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure, Tehničkiglasnik 9, 1(2015), 35-39.
13. Ayberk Kaya, FikriBulut, SelçukAlemdag and AytunaSayin. 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.
14. Aulbach, B. and Ziegler, M. (2013). Simplified design of excavation support and shafts for safety against hydraulic heave. Geomechanics and Tunnelling 6(4), 362-374. DOI: 10.1002/geot11.201300031.
15. 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. Gosstroem SSSR 12.12.85 (red. 30.06.2003). M.: Gosstroy SSSR; 1985. 67 s. [Construction rules and regulations. Bases of hydraulic structures: approved by Gosstroy of the USSR 12.12.85 (30.06.2003). Moscow: Gosstroy of the USSR; 1985. 67 p. (In Russ.)]
- 2.SNiP 2.06.09-84. Tunneli gidrotekhnicheskije: utv. Gosstroem SSSR 14.11.84: vzamen SN 238-73. M.: Gosstroy SSSR,1985. 28 s. [Construction rules and regulations. Hydraulic tunnels: ap-

- proved by Gosstroy of the USSR 14.11.84: instead of SN 238-73. Moscow: Gosstroy of the USSR; 1985. 28 p. (In Russ.)]
3. Lekhnitskiy S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela*. M.: Nauka; 1977. 416 s. [Lekhnitskiy S.G. The theory of elasticity of anisotropic body. Moscow: Nauka; 1977. 416 p. (In Russ.)]
 4. Tsytoovich N.A. *Mekhanika gruntov*. M.: Vyssh. Shk; 1983. 288 s. [Tsytoovich N.A. Soil mechanics. Moscow: Higher school; 1983. 288 p. (In Russ.)]
 5. Bautdinov D.T. *Konechno-elementnyy analiz gidrotekhnicheskikh tunneley bez obdelki, prolozhennykh v transversalno-izotropnykh skalnykh gruntakh*. Diss... kand. tekhn. nauk. M.; 2012. 175 s. [Bautdinov D.T. Finite element analysis of hydrotechnical tunnels without lining, contained in a transversely isotropic rock. PhD Dissertation. Moscow; 2012. 175 p. (In Russ.)]
 6. Bautdinov D.T. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya transversalno-izotropnogo skalnogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya*. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2011;3:93-98. [Bautdinov D.T. Investigation of the stress state of transversely isotropic rock soils near the hydraulic tunnel of circular cross-sectional shape. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2011;3:93-98. (In Russ.)]
 7. Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boev. Yu.A. *Sistemnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy*. M.: Institut SNG; 2012. 392 s. (365-388). [Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boev. Yu.A. System analysis of the stress state of hydraulic structures. Moscow: Institute of CIS countries; 2012. 392 s. (365-388). (In Russ.)]
 8. Frolov M.I. *Teoriya uprugosti i uprugo-plastichnosti v peremeshcheniyakh*. M.: Institut SNG; 2012. 166 s. [Frolov M.I. Theory of elasticity and elasto-plasticity and in movements. Moscow: Institute of CIS countries; 2012. 166 p. (In Russ.)]
 9. Li J.C., Li H.B., Ma G.W., Zhou Y.X. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;35:227–234.
 10. Jiang, N., Zhou, C. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;32:52–57.
 11. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN. 2009.
 12. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure. *Tekhnicheskii glasnik*. 2015;9:35-39.
 13. Kaya A., Bulut F., Alemdag S., Sayin A. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: a case study from Turkey. *Scientific Research and Essays*. 16 December, 2011;6(31):6566-6583. DOI: 10.5897/SRE11.1691.
 14. Aulbach B., Ziegler M. Simplified design of excavation support and shafts for safety against hydraulic heave. *Geomechanics and Tunnelling*. 2013;6(4):362-374. DOI: 10.1002/geot11.201300031.
 15. Zhou Y., Zhao J. Assessment and planning of underground space use in Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. 249-256. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.018.

Сведения об авторах.

Баутдинов Дамир Тахирович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных конструкций.

Джамалудинов Магомед Магомеднабиевич – инженер отдела капитального строительства государственного казенного учреждения РД «Экосервис»

Information about the authors.

Damir T. Bautdinov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof.

Magomed M. Dzhamaludinov – Engineer, Department of capital construction of the state institution RD «Ecoservice»

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.09.2016.

Принята в печать 28.11.2016.

Conflict of interest

Received 28.09.2016.

Accepted for publication 28.11.2016.