

## Численные методы расчета конструкций

УДК 502/504: 69.035.4: 539.31

### КОНЕЧНО - ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ОСНОВАНИЯ

Д.Т. БАУТДИНОВ, канд. техн. наук, доцент

М.М. ДЖАМАЛУДИНОВ, аспирант

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – университет природообустройства МСХА им. К.А. Тимирязева»

**Аннотация.** В статье проведен 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. Угол наклона плоскости изотропии моделирует наклонное залегание слоев грунта. Определены тангенциальные напряжения на контуре выработки, позволяющие оценивать прочность грунтовой среды при различных глубинах заложения.

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

#### Введение

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 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 анизотропии.

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

**Постановка задачи.** Целью данной работы является исследование напряженного состояния на контуре гидротехнического туннеля круговой формы сечения от собственного веса трансверсально-изотропного скального грунта с углом наклона плоскости изотропии  $\alpha$  равном 60, 75 и 90 градусов, при различных упругих характеристиках в ортогональных направлениях. Угол наклона плоскости изотропии  $-\alpha$ , моделирует наклонное залегание слоев скального грунта.

**Методы исследования.** Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений. Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3],[9],[10] 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 перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками [6] (рис. 1).

Анализ напряженного состояния выполнен с использованием программного комплекса, основанного на МКЭ. Предварительно были определены раз-

мер и тип элемента, пригодного для расчета, на основе решения тестовой задачи. В качестве тестовой задачи была рассмотрена упругая изотропная среда, подверженная сжатию и содержащая круглую выработку. Для такой задачи имеется аналитическое решение Кирша [3].

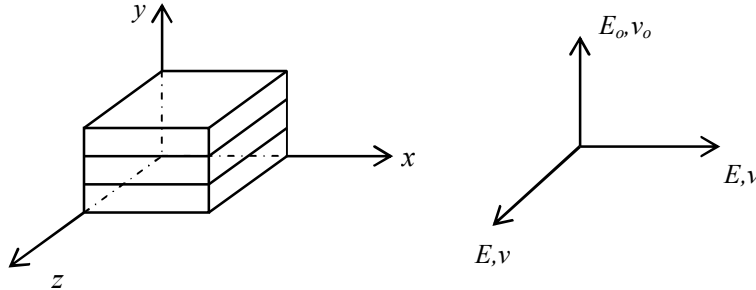


Рис. 1. Модель трансверсально-изотропной среды

На рис. 1 обозначено:  $E = E_x = E_z$  – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии;  $E_0 = E_y$  – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении, нормальном к плоскости изотропии;  $\nu = \nu_{xz} = \nu_{zx}$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии;  $\nu_0 = \nu_{xy} = \nu_{zy}$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости нормальной к плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии.

Обозначим  $G = G_{xz}$  – модуль сдвига в плоскости изотропии (ZOX) определяемый по известной зависимости (1),  $G_0 = G_{xy} = G_{yz}$  – модуль сдвига в любой плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии (ZOX), которые можно определить по формуле К. Вольфа (2) [3]:

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

$$G_0 = \frac{EE_0}{E + E_0(1 + 2\nu_0)}. \quad (2)$$

В качестве расчетной схемы, моделирующей гидротехнический туннель без отделки 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],[8]. 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.

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 60, 75 и 90 градусов. Анализ напряженного состояния при углах наклона плоскости изотропии 15, 30, 45 градусов можно найти в работе [7].

Из рис. 3 видно, что растягивающие напряжения на контуре выработки значительно меньше, чем в изотропной среде, а сжимающие напряжения не-много возрастают.

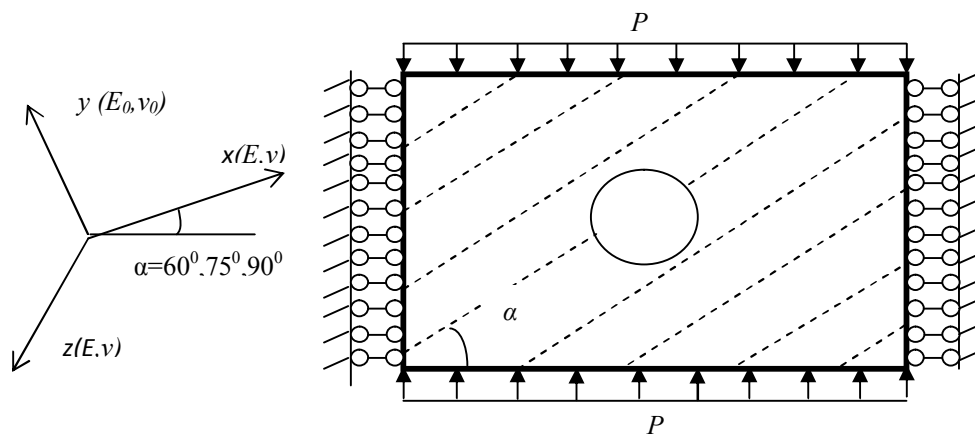


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды ( $\alpha$  – угол наклона слоев грунта или плоскости изотропии)

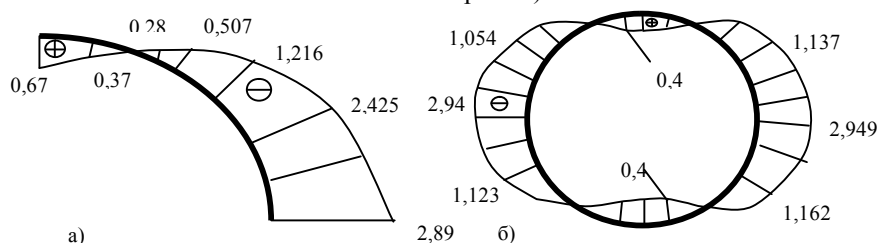


Рис. 3. Эпюры относительных тангенциальных напряжений на контуре круговой выработки от собственного веса а) изотропного грунта при  $\nu = 0,1$  с учетом симметрии; б) трансверсально-изотропного грунта при угле наклона плоскости изотропии  $60^\circ$  и  $E/E_0=1,5$ ,  $\nu_0/\nu = 2$ .

В таблице 1 приведены значения наибольших относительных тангенциальных напряжений на контуре выработки при различных отношениях упругих характеристик, в ортогональных направлениях в зависимости от угла наклона слоев скального грунта. В случае если на контуре выработки растягивающие напряжения не возникают или имеют малые значения по сравнению со сжимающими (в 20 и более раз), то за наибольшие напряжения принимались относительные сжимающие тангенциальные напряжения. Зная величину относительных напряжений, согласно принципу суперпозиций линейной теории упругости, всегда можно установить истинное напряженное состояние, умножая полученные результаты на реальную величину нагрузки.

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 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. 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.

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

$v/v_0$	$E/E_0$									
	$\alpha = 0^0$					$\alpha = 60^0$				
	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	0,67	0,683	0,698	0,714
1,5	0,491	0,635	0,745	0,832	0,903	0,491	0,54	0,571	0,594	0,613
2	0,32	0,439	0,524	0,585	0,630	0,318	0,40	0,446	0,475	0,494
2,5	0,149	0,241	0,298	0,331	0,346	0,140	0,249	0,306	0,337	0,352
3	-2,742	-2,621	-2,560	-2,528	-2,513	-2,697	-2,786	0,146	0,173	0,178
3,5	-2,704	-2,602	-2,558	-2,544	-2,677	-2,636	-2,696	-2,775	-2,828	-2,861
$v/v_0$	$E/E_0$									
	$\alpha = 75^0$					$\alpha = 90^0$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	0,67	0,62	0,588	0,563	0,544	0,67	0,601	0,551	0,511	0,479
1,5	0,495	0,506	0,499	0,488	0,478	0,495	0,493	0,470	0,446	0,425
2	0,322	0,385	0,401	0,404	0,402	0,322	0,378	0,383	0,375	0,364
2,5	0,138	0,252	0,291	0,306	0,310	0,140	0,252	0,284	0,292	0,290
3	-2,724	-2,951	0,162	0,185	0,191	-2,724	-2,984	0,167	0,188	0,193
3,5	-2,651	-2,875	-3,046	-3,185	-3,302	-2,653	-2,911	-3,112	-3,278	-3,420

**Вывод.** Результаты 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.

© Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М. М. 2017

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

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. – 175 с.
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. 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. – Т. 43. – № 4. – С. 144—152.
8. Фролов М.И., Баутдинов Д.Т., Боев Ю.А. Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений. – М.: Институт СНГ, 2012. – 392 с.
9. Фролов М.И. Теория упругости и упруго-пластичности в перемещениях. – М. Институт СНГ. – 2012. – 166с.
10. Li J.C., Li H.B., Ma G.W., Zhou Y.X. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. –Tunnel. Underground Space Technology. – 2013. –35. 227–234.

Поступила в редакцию 29 апреля 2017 г. Прошла рецензирование 19 мая 2017 г.

Принята к публикации 14 июня 2017 г.

**Об авторах:**

**БАУТДИНОВ ДАМИР ТАХИРОВИЧ**, родился в 1979 году, окончил Московский государственный университет природообустройства. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерные конструкции» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – университет природообустройства МСХА им. К.А. Тимирязева». Основные направления исследований: теория упругости анизотропного тела, строительная механика подземных гидротехнических сооружений, динамика и устойчивость строительных конструкций при различного рода воздействиях. E-mail: damir.tt1@mail.ru

**ДЖАМАЛУДИНОВ МАГОМЕД МАГОМЕДНАБИЕВИЧ**, родился в 1986 году. Окончил Московский государственный университет природообустройства. Ведущий инженер отдела капитального строительства АО «ЧиркейГЭСстрой». Основные направления исследований: расчет подземных сооружений с учетом анизотропии грунтовой среды. E-mail: Djamaludinov86@mail.ru

**Для цитирования:** 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, DOI: 10.22363/1815-5235-2017-5-56-61.

References

1. SNiP 2.02.02-85\*. Bases of Hydro Technical Erections. Gosstroy SSSR 12.12.85 [Red. 30.06.2003], Moscow: Gosstroy SSSR, 1985, 67 p.
2. SNiP 2.06.09-84. Hydro technical tunnels. Gosstroy SSSR 14.11.84. – Moscow: Gosstroy SSSR, 1985, 28 p.
3. Lehnitzkiy, S.G. (1977). *Teoriya Uprugosti Anizotropnogo Tela [Theory of Elasticity of Anisotropic Body]*, Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
4. Tzytovich, N.A. (1963). *Mechanics of Soil*, Moscow: Veshh. Shkola, 288 p.
5. Bautdinov, D.T. (2012). Finite element analysis of hydro technical erections without lining driven in transversal isotropic rock soils, Dis. PhD (Technical Science), Moscow, 175 p.
6. Bautdinov, D.T. (2011). Investigation of stress state of transversal isotropic rock soil near the hydro technical tunnel with cross-section of circular form, *Privolzhskiy Nauchniy Zhurnal*, (3), 93—98 (in Russian).
7. Bautdinov, D.T., Djamaludinov, M.M. (2016). A stress state of rock soil of the hydro technical tunnel with cross-section of circular form with taking into account anisotropy of soil body, *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Tehnicheskie Nauki*, 43 (4), 144—152 (in Russian)
8. Frolov, M.I., Bautdinov, D.T., Boev, Yu.A. (2012). *A System Analysis of Stress State of Hydro Technical Erection*. Moscow: Institut SNG, 392 p.
9. Frolov, M.I. (2012). *Theory of Elasticity and Elastic-and-Plasticity in Displacements*, Institut SNG, 166 p.
10. 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 Technology*. 35, 227—234.

**THE FINITE ELEMENT STRESS STATE ANALYSIS OF UNDERGROUND HYDRAULIC ERECTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPY OF THE MEDIUM**

D.T. BAUTDINOV, M.M. DJAMALUDINOV

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow*

In this article, the stressed state analysis of a transverse-isotropic rocky soil near a hydro-technical tunnel is carried out. The cross section of the tunnel is circular. The load considered in the analysis is the self-weight of the surrounding soil. The analysis is carried out for various resilient characteristics of the soil and in the orthogonal directions for various slopes. The slope of the plane of isotropy models a sloping bedding of layers of earth. The slope of the plane of isotropy models a sloping bedding of layers of earth. The tangential stresses are defined at the entry line. This allows estimating the strength of the surrounding soil for various laying depth.

**KEY WORDS:** deformation module, Poisson's ratio, transverse-isotropic medium, theory of elasticity

**Article history:** Received: April 29, 2017. Revised: May 19, 2017. Accepted: June 14, 2017.

**About the authors:**

*BAUTDINOV DAMIR TAHIROVICH* was born in 1979. PhD holder, associate professor of the Department of Engineering Design of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural academy named after K. A. Timiryazev. Graduated from the Moscow State University of Engineering in 2001. Field of scientific interests: The theory of elasticity of anisotropic bodies, the structural mechanics of underground hydraulic structures, dynamics and stability of building structures at various influences.

*DJAMALUDINOV MAGOMED MAGOMEDNABIEVICH* was born in 1986. Engineer of the capital construction Department of the state institution of the Republic of Dagestan "Ekoservis". Graduated from the Moscow state University of environmental engineering. Moscow 2008. Conducts scientific work in the field of analysis of underground structures taking into account the anisotropy of soil medium. Phone: +7(925) 774-06-10, e-mail: [Djamaludinov86@mail.ru](mailto:Djamaludinov86@mail.ru)

**For citation:**

*Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M.* (2017) The finite element stress state analysis of underground hydraulic erections taking into account the anisotropy of the medium. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, No 5, 56—61, DOI: 10.22363/1815-5235-2017-5-56-61.

