

3. Kasianov A.E. Prirodoohrannye tehnologii osushitel'nykh melioratsij: monografiya. – M.: FSBEI HE MSUEE, 2012. – 196 s.

The material was received at the editorial office  
30.05.2016.

#### Information about the author

**Kasianov Alexandr Evgenjevich**, doctor of technical sciences, professor of the chair «Lands reclamation and recultivation» FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, d. 44; e-mail.ru.: kasian64@mail.ru, тел. 8(499)9763070.

УДК 502/504:69.035.4:539.31

**Д.Т. БАУТДИНОВ, У.И. АТАБИЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ НАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

*Проведен параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи напорного гидротехнического туннеля прямоугольной формы сечения от внутреннего напора воды, которые широко распространены в области гидротехнического строительства и являются одним из самых сложных, трудоемких и дорогих типов сооружений, входящих в состав основных сооружений гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения. Определены тангенциальные напряжения по контуру выработки гидротехнического туннеля при различных отношениях модулей деформаций и коэффициентов Пуассона, позволяющие оценивать прочность грунтового массива при различных глубинах заложения туннеля. 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. Решение такой задачи невозможно аналитическими методами, поэтому анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип элемента, пригодного для расчета на основе решения тестовой задачи.*

*Трансверсально-изотропная среда, теория упругости, плоская деформация, модуль деформаций, коэффициент Пуассона.*

**Введение.** Подземные гидротехнические сооружения широко распространены в области гидротехнического и мелиоративного строительства и одновременно являются одними из самых сложных и дорогих типов основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения.

Гидротехнические туннели глубокого заложения могут возводиться с обделкой и без неё, при проходке в слаботрещиноватых скальных неразмываемых грунтах. Применение гидротехнических туннелей без обделки позволяет снизить их стоимость на 20–30% и сократить сроки строительства на 10–15%.

При проектировании гидротехнических туннелей глубокого заложения, прохо-

дящих в анизотропных грунтах с отношением модулей деформаций в разных направлениях более чем 1,4, расчет следует проводить с учетом анизотропии [1].

По деформационности и прочности в различных направлениях массивы скальных грунтов следует считать изотропными при коэффициенте анизотропии не более 1,5. Под коэффициентом анизотропии понимают отношение большего значения характеристики к меньшему в двух заданных направлениях [2].

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

Целью данной работы является проведение параметрического анализа напряженного состояния анизотропного скального грунта с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях от внутреннего напора воды на контуре выработки прямоугольной формы сечения, с использованием модели трансверсально-изотропной среды.

**Материалы и методы исследований.** Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком, трансверсально-изотропном скальном грунте, можно свести к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Решение такой задачи невозможно аналитическими методами, поэтому анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS.

Расчетная схема, моделирующей гидротехнический туннель со значительной глубиной заложения без обделки с прямоугольной формой сечения, проходящий в скальных грунтах с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях с учетом геометрической и физической симметрии, представлены на рисунке 1. Размеры выбранной расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (Критерий М.И. Фролова) [3].

Для удобства вычислений, согласно принципу суперпозиции линейной теории упругости, напряженное состояние туннеля предварительно определялось от единичной нагрузки, моделирующей внутренний напор воды. Затем, умножая полученные результаты на реальную величину напора, можно получить истинное напряженное состояние.

При проведении расчетов задавались различные значения коэффициента анизотропии  $\alpha = E/E_0$  от 1 до 3 с шагом 0,5 и отношения  $v_0/v$  от 1 до 3,5 с шагом 0,5 при  $v = 0,1$ , здесь  $E$  и  $E_0$ ,  $v$  и  $v_0$  – модули деформации и коэффициенты Пуассона в изотропном и трансверсальном направлениях соответственно. В координатных индексах эти параметры соответствуют  $E = E_x = E_z$ ,  $E_y = E_0$ ,  $v = v_{xz} = v_{zx}$ ,  $v_0 = v_{xy}$ .

Рассмотрим результаты расчета на единичный внутренний напор воды в гидротехническом туннеле без обделки, проходящем в трансверсально-изотропном скальном грунте, при  $p_w = 1$ .

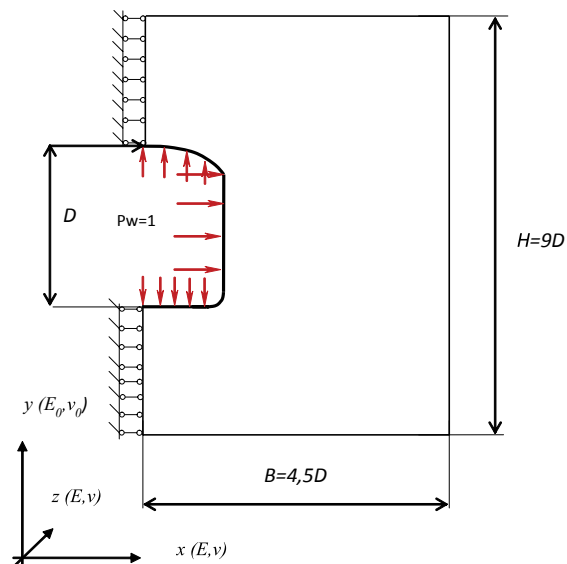


Рис. 1. Расчетная схема, моделирующая внутренний напор воды на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды

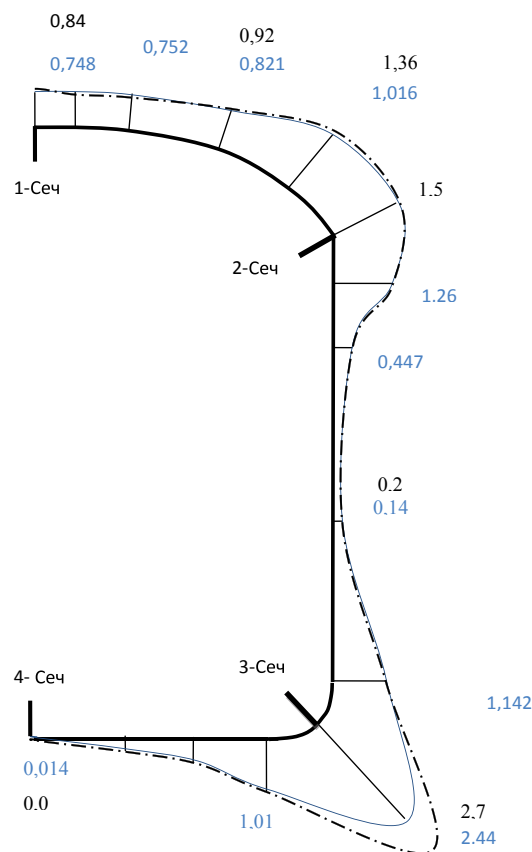


Рис. 2. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля прямоугольного сечения от внутреннего напора воды для изотропной среды ( $v = 0,1$ ) указана прямой непрерывной линией. Эпюра относительных тангенциальных напряжений при  $E/E_0 = 2$ ,  $v_0/v = 3,5$ ; для трансверсально-изотропной среды указана штрихпунктирной линией

Для оценки влияния анизотропности свойств грунтового массива на напряженное состояние туннеля на рисунке (2) приведена эпюра относительных окружных напряжений ( $\eta$ ) на контуре выработки прямоугольной формы для изотропной среды. Также приведена эпюра относительных тангенциальных напряжений при  $E/E_0 = 2$ ,  $\nu_0/\nu = 3,5$ , для трансверсально-изотропной среды.

Как следует из рисунка 2, наиболее опасные для скального грунта – относительные тангенциальные растягивающие напряжения, локализующиеся в 4-х основных (в силу симметрии) частях прямоугольной выработки, и увеличиваются по сравнению с напряжениями в изотропной среде. Также в некоторых сечениях контура круговой выработки растягивающие напряжения уменьшаются относительно напряжений в изотропной среде.

Таблица 1

**Относительные тангенциальные напряжения в нижнем правом сечении выработки прямоугольной формы от внутреннего напора воды в зависимости от отношений упругих характеристик**

Коэффициент анизотропии $E/E_0$	Соотношение коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu$					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	1,609	1,620	1,631	1,642	1,654	1,664
1,5	1,583	1,592	1,6	1,609	1,618	1,626
2	1,563	1,570	1,577	1,585	1,552	1,574
2,5	1,547	1,553	1,559	1,565	1,571	1,577
3	1,534	1,539	1,544	1,549	1,555	1,560

Таблица 2

**Значения относительных тангенциальных напряжений ( $\eta$ ) на контуре выработки прямоугольной формы от собственного веса грунта в зависимости от соотношений упругих характеристик в ортогональных направлениях при  $\nu = 0,1$ . Номера сечений указаны на рисунке 2**

Коэффициент анизотропии $a$	Номер сечения	Соотношение коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu$					
		1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	1	0,73	0,567	0,403	0,236	0,067	-0,104
	2	-3,165	-3,171	-3,178	-3,186	-3,194	-3,203
	3	-2,698	-2,813	-2,929	-3,046	-3,165	-3,285
	4	0,765	0,659	0,551	0,44	0,327	0,212
1,5	1	0,928	0,756	0,582	0,406	0,228	0,049
	2	-3,15	-3,154	-3,159	-3,164	-3,17	-3,176
	3	-2,812	-2,918	-3,026	-3,135	-3,246	-3,357
	4	0,961	0,852	0,741	0,629	0,514	0,398
2	1	1,088	0,907	0,725	0,542	0,356	0,169
	2	-3,132	-3,135	-3,138	-3,141	-3,145	-3,149
	3	-2,889	-2,99	-3,092	-3,195	-3,299	-3,404
	4	1,123	1,011	0,898	0,783	0,666	0,548
2,5	1	1,224	1,036	0,847	0,656	0,464	0,27
	2	-3,114	-3,116	-3,118	-3,12	-3,123	-3,125
	3	-2,947	-3,043	-3,141	-3,239	-3,339	-3,438
	4	1,263	1,149	1,033	0,916	0,797	0,677
3	1	1,343	1,148	0,952	0,756	0,557	0,357
	2	-3,098	-3,099	-3,1	-3,101	-2,254	-2,289
	3	-2,993	-3,085	-3,179	-3,273	-2,643	-2,638
	4	1,388	1,272	1,154	1,034	0,914	0,792

При отношении  $E/E_0=2$ ,  $\nu_0/\nu=3,5$  наибольшие растягивающие напряжения в сечении № 1 равны  $\eta_{+max}=0,84$ , в сечении № 2 равны  $\eta_{+max}=1,57$ , в сечении № 3 равны  $\eta_{+max}=2,71$ , в сечении № 4 равны  $\eta_{+max}=0$ , а  $\eta_{-max}=-0,96$ . При дальнейшем увеличении отношений модулей деформаций и коэффициентов Пуассона растягивающие напряжения по контуру выработки возрастают по сравнению с напряжениями в изотропной среде.

В таблице 1 представлены наиболее опасные значения относительных тангенциальных напряжений в нижнем правом сечении выработки прямоугольной формы от внутреннего напора воды в зависимости от отношений упругих характеристик.

Рассмотрим совместное действие внутреннего напора воды и собственного веса грунта на напорный туннель без обделки прямоугольной формы сечения.

Анализ напряженного состояния туннеля прямоугольной сечения на собственный вес грунта представлен в работе [4]. Согласно работе [4] относительные окруж-

ные напряжения на контуре выработки при ( $\nu=0,1$ ) представлены в таблице 2 в зависимости от сечения контура выработки (рис. 1).

Умножая относительные напряжения от внутреннего напора воды на величину реального напора и умножая относительные напряжения от собственного веса грунта на реальную глубину заложения туннеля, а затем, в силу линейности решаемой задачи, суперпозируя результаты, можно получить истинные значения окружных напряжений на контуре выработки от совместного действия внутреннего напора воды и собственного веса грунта.

Для примера рассмотрим:

- глубина заложения туннеля  $H = 100$  м;
- реальный напор воды  $H_W = 100$  м;
- удельный вес грунта  $\gamma_{гр} = 25$  кН/м<sup>3</sup>;
- удельный вес воды  $\gamma_B = 10$  кН/м<sup>3</sup>.

$$\sigma_{\Sigma} = H (\rho_B \gamma_B + \gamma_{гр} \rho_{гр}) \quad (2)$$

Результаты расчета для наиболее опасного сечения прямоугольной выработки при совместном действии представлены в таблице (3), кПа

Таблица 3

**Результаты расчета для наиболее опасного сечения  
прямоугольной выработки при совместном действии**

Коэффициент анизотропии <i>a</i>	Наименование сечения	Соотношение коэффициентов Пуассона $\nu_0/\nu$					
		1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	Нижнее правое сечение	4044	3965,1	3885,3	3804,5	3721,65	3635,4
1,5	Нижнее правое сечение	3923,6	3846,2	3766,8	3688,9	3606,46	3524,1
2	Нижнее правое сечение	3847,4	3772,4	3696,4	3617	3296,49	3355
2,5	Нижнее правое сечение	3795	3719,9	3645,4	3570,9	3491,89	3416,4
3	Нижнее правое сечение	3751,9	3680,9	3607,8	3534,7	4175,93	4200,9

**Выводы**

Результаты параметрического анализа напряженного состояния скального грунта в окрестности выработки гидротехнического туннеля прямоугольной формы сечения показывают, что на напряженное состояние оказывает влияние анизотропия упругих свойств скального массива. Следовательно, при проектировании подземных сооружений необходимо более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, особое внимание уделяя упругим характеристикам, и расчеты следует производить, учитывая анизотропию упругих свойств.

**Библиографический список**

1. СНиП 2.06.09–84. Туннели гидротехнические. – М.: Госстрой СССР, 1985.

2. СНиП 2.02.02–85. Основания гидротехнических сооружений. – М.: Госстрой СССР, 1985.

3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. 416 с.

Материал поступил в редакцию 31.03.2016.

**Сведения об авторах**

**Баутдинов Дамир Тахирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая и строительная механика» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Прянишникова ул., д. 19; тел.: +7(499)976-33-44; e-mail: damir.tt1@mail.ru

**Атабиев Умар Исхакович**, инженер, аспирант кафедры «Гидротехнические сооруже-



ния» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая

ул., д.44; тел.: +7(499)976-33-44; +7(499)976-0030; +7(499)976-0428; e-mail: a\_omar@mail.ru

**D.T. BAUTDINOV, U.I. ATABIEV**

Federal state budget educational institution of higher education  
«Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev»

## **STRESS STATE OF THE TRANSVERSELY ISOTROPIC ROCKS NEAR A PRESSURE HYDRO-TECHNICAL TUNNEL OF A RECTANGULAR CROSS SECTION FORM**

*The parametric analysis is fulfilled of the stress state of a transversely isotropic rock near the pressurized hydraulic tunnel of a rectangular cross-section from the internal water pressure which are prevalent in the field of hydraulic engineering construction and are one of the most complex, labor-intensive and expensive types of facilities being a part of main structures of waterworks, irrigation and drainage systems and water supply systems. There are determined tangential stresses on the contour of working out a hydro-technical tunnel at different ratios of modulus of deformations and Poisson's ratios allowing estimating the strength of the soil mass under various depths of the tunnel location. Calculation of a long hydro-technical tunnel built in hard, transversely isotropic rocks is reduced to the task of plain deformation of the theory of elasticity for the transverse-isotropic medium containing the tunnel output. The solution of this problem is not possible by analytical methods, thus the analysis of the stressed state was fulfilled by a method of finite element using the software system ANSYS. Preliminarily there were determined sizes and type of the element suitable for the calculation on the basis of the test task solution.*

*Transversally isotropic medium, theory of elasticity, plane deformation, modulus of deformation, Poisson's ratio.*

### **References**

1. SNiP 2.06.09–84. Tunneli gidrotehnikheskie. – М.: Gosstroj SSSR, 1985.
2. SNiP 2.02.02–85. Osnovaniya gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – М.: Gosstroj SSSR, 1985.
3. **Lekhnitsky S.G.** Teoriya uprugosti anizotropnogo tela. – М.: Nauka, 1977. 416 s.

The material was received at the editorial office  
31.03.2016.

### **Information about the authors**

**Bautdinov Damir Takhirovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Technical and structural mechanics» FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, Pryanishnikova street, 19. Tel.: +7(499)976-33-44. E-Mail: damir.tt1@mail.ru.

**Atabiev Umar Iskhakovich**, engineer, postgraduate student of the chair «Hydro-technical structures». FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., d. 44, Tel.: +7(499)976-33-44; +7(499)976-0030; +7(499)976-0428. E-mail: a\_omar@mail.ru

УДК 502/504: 532.621

**М.С. ПАЛИИВЕЦ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

## **К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ**

*В настоящее время известно более двух тысяч научных работ, посвященных гидравлическим сопротивлениям напорных потоков. Исследования гидравлического коэффициента трения в круглых и прямоугольных трубах производились отечественными и зарубежными исследователями достаточно давно и проблема определения*