

сооружений при динамических воздействиях: сб. науч. трудов. – М.: МИСИ, 1976. – С. 57–58.

3. Ганем С. Х. Совершенствование конструкций и методов расчетного обоснования грунтовых водосливных плотин: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУП, 1991. – С. 70–75.

4. Сулейман А. Совершенствование моделирования и эксплуатации конструкций водосбросных грунтовых плотин // Природообустройство. – 2011. – № 2. – С. 49–52.

Материал поступил в редакцию 16.05. 11.

Сулейман Ахмад, аспирант  
E-mail: as79scs@hotmail.com

УДК 502/504 : 69.035.4

**Д. Т. БАУТДИНОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КОРЫТООБРАЗНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ**

*В статье проведен параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля корытообразной формы сечения от нагрузки в виде собственного веса грунта. 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.*

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

*In the paper there is carried out a parametric analysis of the stress state of transversally isotropic rock ground close to a trough-shaped hydro-technical tunnel as a result of the loading in a way of its own weight. Tangential stresses acting along hydro-technical tunnel cutout are defined taking into account different modulus of deformation ratios and Poisson coefficients which allows evaluate rock soil massif strength at different depths of tunnel location.*

*Transversally isotropic medium, theory of elasticity, plane deformation, modulus of deformation, Poisson coefficient.*

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

При проходке в слаботрециноватых скальных неразмываемых грунтах гидро-

технические туннели глубокого заложения могут возводиться с обделкой и без нее. 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, проходящих в анизотропных грунтах с отношением модулей деформаций в

разных направлениях более чем 1,4, расчет следует проводить с учетом анизотропии [1]. По степени деформирования 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].

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

Целью проведенной автором работы был параметрический анализ напряженного состояния скального грунта с различными упругими характеристиками в двух ортогональных направлениях от собственного веса грунта вблизи гидротехнического туннеля корытообразной формы поперечного сечения. При этом была использована модель трансверсально-изотропной среды. Параметрический анализ напряженного состояния выполнен с применением программного комплекса ANSYS.

В качестве расчетной схемы, моделирующей гидротехнический туннель, проходящий в скальных грунтах с различными упругими характеристиками в двух ортогональных направлениях, со значительной глубиной заложения, без обделки, с корытообразной формой поперечного сечения, рассматривалась бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, содержащая выработку и находящаяся в условиях плоской деформации. Контур, моделирующий выработку, был принят, согласно нормам, корытообразной формы, с соотношением сторон  $h/b = 1,0$  [1]. Расчетная схема представлена на рис. 1.

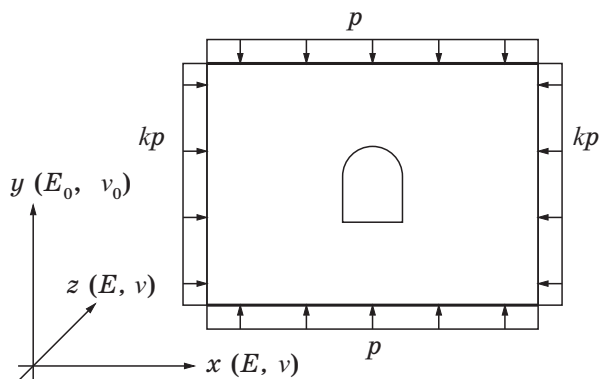


Рис. 1. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель по модели трансверсально-изотропной среды

В расчетах были приняты следующие обозначения:  $p$  и  $kp$  – соответственно статическая вертикальная и горизонтальная равномерно распределенная нагрузка;  $k$  – коэффициент бокового давления грунта;  $E$  – модуль деформаций для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии;  $E_0$  – модуль деформаций для растяжения-сжатия в направлении нормальном к плоскости изотропии;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в этой плоскости;  $\nu_0$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в направлении, нормальном к плоскости изотропии;  $xz$  – плоскость изотропии.

Коэффициент бокового давления грунта в случае трансверсально-изотропной среды определяется по формуле

$$k = \frac{E}{E_0} \left( \frac{\nu_0}{1} \right) \quad (1)$$

В процессе расчета задавались различные отношения модулей деформаций и коэффициентов Пуассона в плоскости изотропии и в плоскости, нормальной к плоскости изотропии в диапазоне от 1 до 4,5 с шагом 0,5.

В работе было исследовано напряженное состояние гидротехнического туннеля корытообразного сечения с соотношением размеров:  $h/b = 1$ ;  $r_1/b = 0,5$ ;  $r_2/b = 0,1$ .

На рис. 2 приведена эпюра относительных тангенциальных напряжений  $\eta$  по контуру туннеля корытообразного сечения при  $h/b = 1$  от собственного веса изотропного грунта при  $\nu = 0,1$ .

Для оценки влияния анизотропии грунтового массива на напряженное состояние туннеля корытообразного сечения на рис. 3 представлены две эпюры относительных тангенциальных напряжений при следующих отношениях:  $E/E_0 = 1$ ;  $\nu_0/\nu = 1,5$ ;  $E/E_0 = 1,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$ .

Как видно из этих эпюр, наибольшие растягивающие напряжения возникают в нижнем сечении корытообразной выработки. При отношении  $E/E_0 = 1$ ;  $\nu_0/\nu = 1,5$   $\eta_{\max} = 0,67$ , что на 16 % меньше, чем напряжения в изотропной среде, где  $\eta_{\max} = 0,777$ . При отношении  $E/E_0 = 1,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$  напряжения в нижнем сечении увеличиваются и достигают значения  $\eta_{\max} = 0,866$ , что на 11,5 % больше, чем напряжения в изотропной среде.

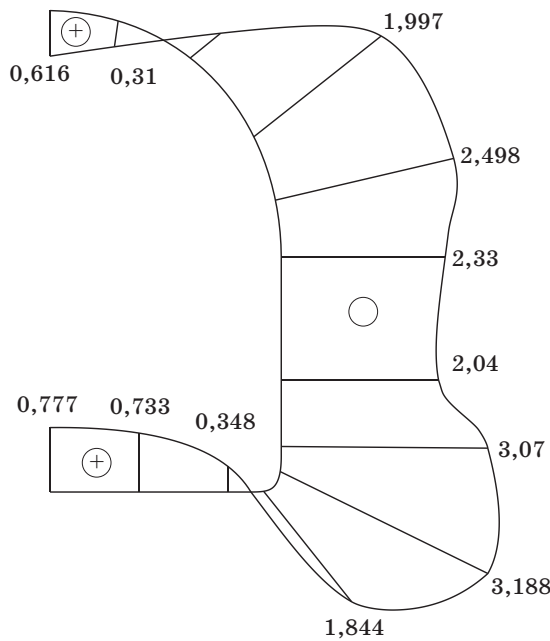


Рис. 2. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля корытообразного сечения ( $h/b = 1$ ;  $r_1/b = 0,5$ ;  $r_2/b = 0,1$ ) от собственного веса изотропного грунта при  $\nu = 0,1$

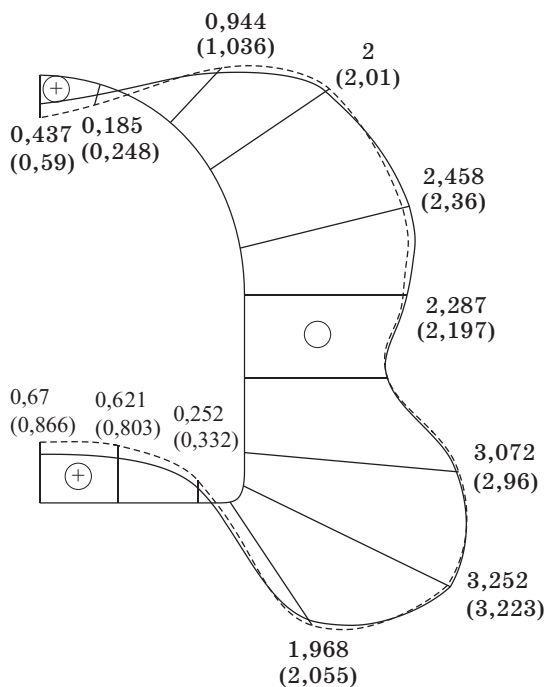


Рис. 3. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля корытообразного сечения ( $h/b = 1$ ;  $r_1/b = 0,5$ ;  $r_2/b = 0,1$ ) от собственного веса трансверсально-изотропного грунта: —  $E/E_0 = 1$ ;  $\nu_0/\nu = 1,5$ ; ---  $E/E_0 = 1,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$

Растягивающие напряжения в верхнем сечении выработки при отношении  $E/E_0 = 1$ ;  $\nu_0/\nu = 1,5$  уменьшаются и равны  $\eta_{\max} = 0,616$  в изотропной среде, а при отношении  $E/E_0 = 1,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$  растягивающие напряжения уменьшаются незначительно и равны  $\eta_{\max} = 0,59$ , что на 4,4 % меньше, чем напряжения в изотропной среде.

Менее выраженную картину отличий наблюдаем в случае с наибольшим сжимающим напряжением, которое концентрируется в нижнем углу выработки. При тех же соотношениях модулей деформации и коэффициентов Пуассона напряжения мало отличаются от напряжений, возникающих в изотропной среде. При  $E/E_0 = 1$ ;  $\nu_0/\nu = 1,5$  напряжение сжатия в нижнем углу выработки равно  $\eta_{\max} = 3,252$ , а при  $E/E_0 = 1,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$   $\eta_{\max} = 3,223$ , что на 2 % и 1 % соответственно отличается от напряжения в изотропной среде (в изотропной среде  $\eta_{\max}$  равно -3,188).

Как показывают расчеты, при дальнейшем росте отношений упругих характеристик растягивающие напряжения в верхнем сечении выработки уменьшаются и затем переходят в сжимающие. Растягивающие напряжения в нижнем сечении при увеличении отношений модулей деформаций и при некоторых отношениях коэффициентов Пуассона продолжают увеличиваться и при отношении  $E/E_0 = 2,5$ ;  $\nu_0/\nu = 1$  принимают наибольшие значения:  $\eta_{\max} = 0,9277$ . Затем, с ростом отношений, растягивающие напряжения в нижнем сечении постепенно уменьшаются и переходят в сжимающие.

Сжимающие напряжения, которые локализуются в нижнем углу выработки, с ростом отношений модулей деформаций и коэффициентов Пуассона постепенно увеличиваются. Для дальнейшего анализа наибольших растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений в различных сечениях туннеля была построена огибающая эпюра (рис. 4).

Как следует из эпюры, при больших отношениях  $E/E_0 = 4,5$  и  $\nu_0/\nu = 4$  опасным становится сжимающее напряжение  $\eta_{\max} = 6,988$  в верхнем сечении выработки, которое в 11 раз превышает растягивающее напряжение в верхнем сечении выработки в случае изотропного грунта ( $\eta_{\max} = 0,616$ ). Также заметно влияние анизотропии на наибольшие сжимающие напряжения в нижнем углу выработки.

Таким образом, учет анизотропии

приводит как к уменьшению, так и к увеличению наибольших растягивающих и сжимающих напряжений по контуру туннеля корытообразного сечения от собственного веса грунта. Причем ее влияние более заметно для верхнего и нижнего сечений туннеля, параллельных оси анизотропии, чем для нижнего углового сечения. Кроме того, влияние на наибольшие растягивающие напряжения отношения  $E/E_0$  существенней влияния отношения  $\nu_0/\nu$ , так как при увеличении отношений  $E/E_0$  сначала происходит увеличение растягивающих напряжений, а затем их уменьшение.

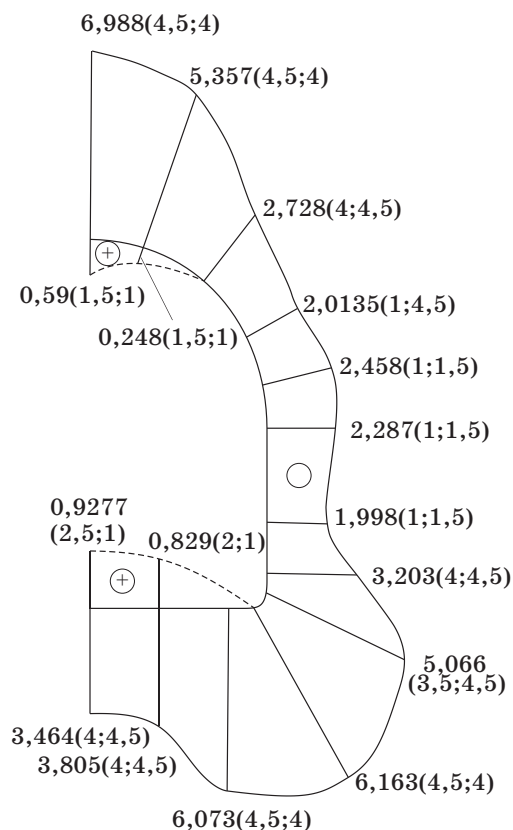


Рис. 4. Огибающая эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля корытообразного сечения ( $h/b = 1$ ;  $r_1/b = 0,5$ ;  $r_2/b = 0,1$ ) от собственного веса трансверсально-изотропного грунта: — сжатие, ---- растяжение (в скобках: первое число – отношение модулей деформаций  $E/E_0$ , второе – отношение коэффициентов Пуассона  $\nu_0/\nu$ )

При этом положение норм [1] о том, что при проектировании гидротехнических туннелей глубокого заложения, проложенных в анизотропных грунтах с отношением модулей деформации в разных направлениях более чем 1,4, расчет следует проводить с учетом анизотропии, в общем случае является неверным.

Как было отмечено, даже при равных в ортогональных направлениях модулях деформации  $E/E_0 = 1 < 1,4$ , но разных коэффициентах Пуассона  $\nu_0/\nu = 1,5$ , опасное для скального трансверсально-изотропного грунта растягивающее напряжение  $\eta_{\max}$  отличается на 16 % от соответствующего напряжения в изотропном грунте. Правда, в меньшую сторону, что позволяет возводить туннель в трансверсально-изотропном грунте на большей глубине, чем в изотропном.

В то же время, утверждение из [1] практически верно для отношений  $E/E_0 = 1,5$  и  $\nu_0/\nu = 1$ , так как в этом случае растягивающие напряжения в опасном сечении на 11,5 % больше, чем напряжения в изотропном грунте. Таким образом, в нормативных документах необходимо регламентировать не только отношение модулей деформаций  $E/E_0$ , но и отношение коэффициентов Пуассона  $\nu_0/\nu$ .

#### Выводы

Результаты параметрического анализа напряженного состояния скального грунта в окрестности выработки гидротехнического туннеля корытообразной формы сечения показывают, что на напряженное состояние большое влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств. Следовательно, при проектировании подземных сооружений необходимо более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, особое внимание уделяя упругим характеристикам. При некоторых отношениях упругих характеристик растягивающие напряжения на контуре выработки не возникают, что благоприятным образом отражается на работе гидротехнического туннеля.

1. Строительные нормы и правила 2.06.09–84. Туннели гидротехнические. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 18 с.

2. Строительные нормы и правила 2.02.02–85\*. – Основания гидротехнических сооружений. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 44 с.

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

4. Цытович Н. А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

Материал поступил в редакцию 13.09.11.

**Баутдинов Дамир Тахирович, старший преподаватель кафедры «Строительная механика»**

Тел. 8 (499) 976–33–44

E-mail: damir.tt1@mail.ru