



УДК 624.19.034.5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ОБДЕЛОК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ
ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ОТ ОСНОВНЫХ
ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ**

**STUDY OF UNDERWATER MUTUAL TUNNEL LININGS STRESS STATE IN
VIEW OF MAIN INFLUENCING FACTORS**

**И.Ю. Воронина
I.Yu. Voronina**

*Тульский государственный университет, Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Tula State University, 92, Lenin Av., Tula, 300012, Russia*

E-mail: virena_29@mail.ru

Ключевые слова: аналитический метод, подводные тоннели, обделки, произвольная форма поперечного сечения, фильтрация, напряженное состояние.

Key words: the analytical design method, underwater tunnels, lining, arbitrary shape of cross-section, water filtration, stress state.

Аннотация. Предложен аналитический метод расчета обделок параллельных некруговых подводных тоннелей, позволяющий учитывать влияние фильтрации воды вглубь массива на напряженное состояние подземных конструкций. Метод базируется на аналитическом решении соответствующей плоской задачи теории упругости для весомой полуплоскости, ослабленной несколькими подкрепленными отверстиями. Рассмотрен пример расчета и установлены зависимости нормальных тангенциальных напряжений в обделках тоннелей от основных влияющих факторов.

Resume. A method for the design of parallel non-circular underwater tunnel linings allowing taking into account water filtration into the rock mass is proposed. The method is based on the analytical solution of elasticity theory plane problem about linearly deformable weighty semi-plane restricted by the outlines of supported openings. Example of the design is given; dependencies of circumferential stresses in tunnel linings on main influencing factors are discovered.

Введение

Реализация современных проектов, направленных на развитие транспортных сетей, предусматривает пересечение протяженных водных преград. Альтернативой мостовым переходам при решении указанной проблемы являются подводные тоннели, в том числе сооружаемые горным способом.

К надежности конструкции тоннелей, сооружаемых под дном водоемов, предъявляются жесткие требования, поскольку они испытывают совместное действие гравитационных сил и давления масс воды, заполняющей водоем. Анализ имеющихся в настоящее время методов расчета [Fotieva, Voronina, 2004; Воронина, Деев, 2006] позволяет заключить, что аналитических методов расчета обделок подводных тоннелей произвольного поперечного сечения, основанных на строгом математическом моделировании взаимодействия комплексов близкорасположенных подземных конструкций и окружающего массива пород (грунта) как элементов единой деформируемой системы в настоящее время не существует.

В связи с этим в Тульском государственном университете разработан метод расчета монолитных обделок параллельных подводных тоннелей некругового (с одной осью симметрии) поперечного сечения [Воронина, 2010], позволяющий определять напряжения, возникающие в подземных конструкциях, как в предположении водонепроницаемости пород, так и с учетом фильтрации воды через породы.

Объекты и методы исследования

В основу нового метода расчета положено аналитическое решение соответствующей плоской задачи теории упругости для полубесконечной весомой среды, моделирующей массив пород и ослабленной произвольным числом любым образом расположенных некруговых отверстий. Кольца, подкрепляющие указанные отверстия, выполнены из различных материалов и моделируют обделки тоннелей. Давление воды на дно водоема моделируется

равномерно распределенной по всей границе полуплоскости нормальной нагрузкой интенсивности $P = -\gamma_w H_w$ (где γ_w – удельный вес воды, H_w – глубина водоема). При этом, в работе [Воронина, 2010] показано, что два рассматриваемых случая – когда массив пород считается водонепроницаемым и когда имеет место фильтрация воды через породы – можно свести к одной задаче теории упругости, общая расчетная схема которой показана на рисунке 1.

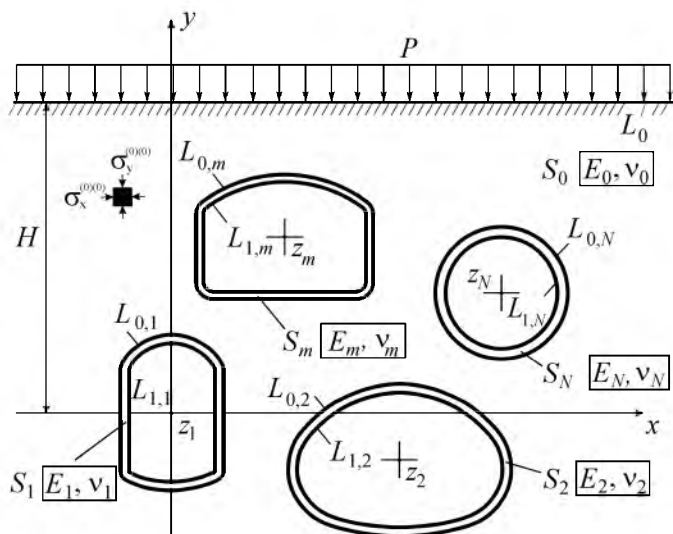


Рис. 1. Общая расчетная схема
Fig. 1. The general design scheme

Решение задачи теории упругости получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [Мухелишвили, 1966], аналитического продолжения комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили через границу полуплоскости [Араманович, 1955], метода Д.И. Шермана [Шерман, 1951] для определения напряженного состояния многосвязных областей, аппарата конформных отображений и комплексных рядов. Ограничением рассматриваемой задачи является требование, чтобы окружности, описанные вокруг наружных контуров колец, не пересекались между собой и не касались границы полуплоскости.

На основе полученного решения задачи разработан метод расчета, алгоритм и компьютерная программа, позволяющая проводить многовариантные расчеты с целью проектирования обделок комплексов подводных тоннелей, сооружаемых горным способом.

Следует отметить, что предложенный метод расчета позволяет учитывать влияние последовательности сооружения тоннелей на напряженное состояние обделок с использованием подхода, предложенного Н.Н. Фотиевой и А.Н. Козловым [Фотиева, Козлов, 1992]. Реологические свойства пород учитываются на основе теории линейной наследственной ползучести [Воронина, 2013].

Результаты и их обсуждение

В качестве иллюстрации возможностей разработанного метода приводятся результаты расчета обделок двух параллельных подводных тоннелей. Поперечное сечение тоннелей показано на рисунке 2.

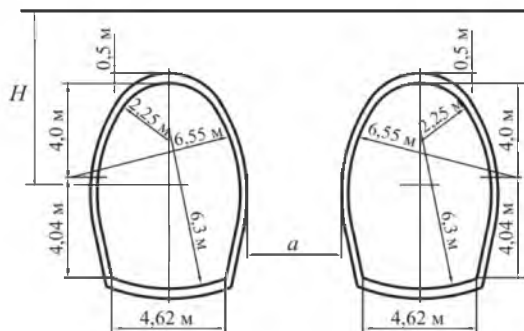


Рис. 2. Поперечное сечение подводных тоннелей
Fig. 2. Cross-section of underwater tunnels

Тоннели пройдены в обводненном массиве пород с деформационными характеристиками $E_0 = 1500$ МПа, $V_0 = 0.3$ на глубине $H = 10$ м под дном водоема. Ширина целика пород между тоннелями $a = 4$ м.

При расчетах принимались следующие исходные данные: удельный вес пород $\gamma = 0.02$ МН/м³, коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве $\lambda = 0.43$, удельный вес пород с учетом взвешивающего действия воды $\tilde{\gamma} = 0.017$ МН/м³, глубина пересекаемого водоема $H_w = 45$ м, удельный вес воды $\gamma_w = 0.01$ МН/м³. Обделки тоннелей изготовлены из бетона с деформационными характеристиками $E_1 = E_2 = 30000$ МПа, $V_1 = V_2 = 0.2$.

Эпюры нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на внешнем и внутреннем контурах поперечного сечения обделки левого тоннеля приведены на рисунке 3 а и б соответственно.

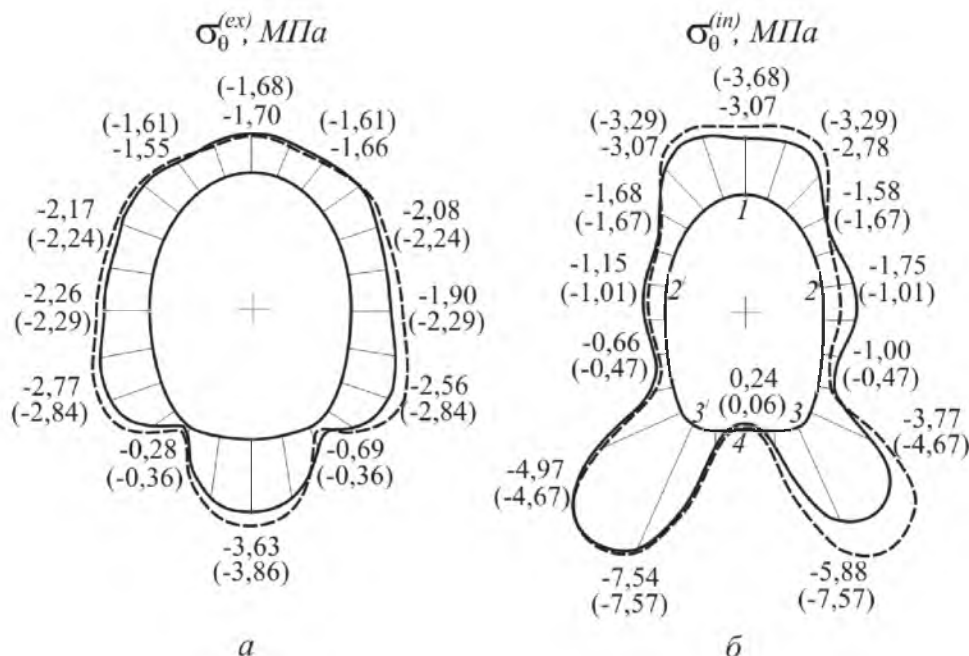


Рис. 3. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений на внешнем (а) и внутреннем (б) контурах обделки левого тоннеля

Fig. 3. Diagrams of circumferential stresses along external (a) and internal (b) outlines of left tunnel lining

Для сравнения полученных результатов на рисунке 3 пунктирными линиями показаны эпюры тех же напряжений, полученные в обделке одиночного подводного тоннеля (величины напряжений даны в скобках).

Из рисунка 3 видно, что в рассматриваемом случае максимальные сжимающие нормальные тангенциальные напряжения возникают в левой угловой точке, а растягивающие – в центральной точке лотка внутреннего контура обделки. Наличие соседнего тоннеля приводит к перераспределению напряжений $\sigma_0^{(in)}$ в точках указанного контура, расположенных со стороны целика.

Для оценки напряженного состояния обделок двух подводных тоннелей (см. рис. 2) исследовались зависимости нормальных тангенциальных напряжений в точках внутренних контуров сечений подземных конструкций от основных влияющих факторов – относительной высоты налегающей толщи H'/R_o (где $R_o = R_{o,1} = R_{o,2}$ – средние радиусы контуров $L_{o,1}$ и $L_{o,2}$), относительной ширины целика между тоннелями a/R_o , относительной глубины водоема H_w/R_o , отношения модулей деформации пород и бетона $\beta = E_o/E_1$ и толщины обделок Δ .

С целью исследования влияния относительной высоты налегающей толщи H'/R_o на напряженное состояние обделок производились расчеты при значениях отношения $\beta = E_o/E_1 = 0.05$ и относительной глубины водоема $H_w/R_o = 15; 30$. На рисунке 4 представлены зависимости нормальных тангенциальных напряжений на внутренних контурах обделок тоннелей от величины H'/R_o для точек, номера которых указаны на рис. 3 б (номера кривых соответствуют номерам характерных точек).

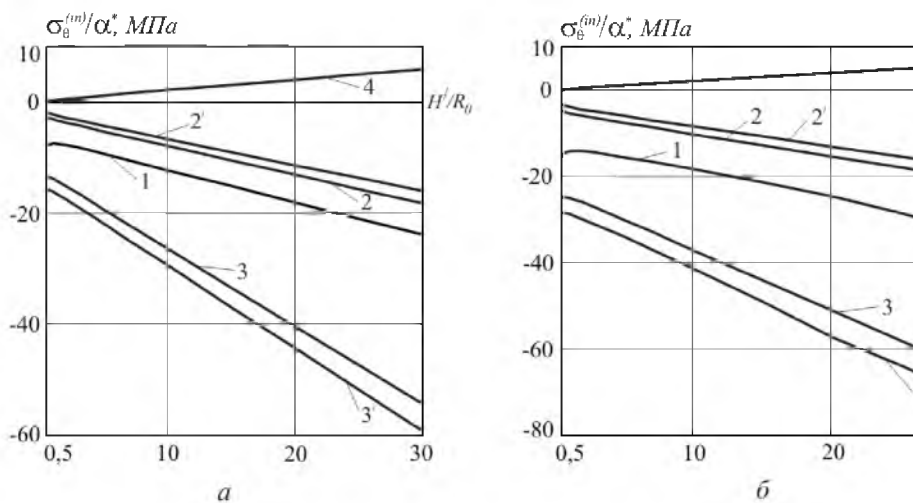


Рис. 4. Зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от относительной высоты налегающей толщи H'/R_o : а – при $H_w/R_o = 15$; б – при $H_w/R_o = 30$
 Fig. 4. Dependencies of stresses $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ on the relative thickness of overburden H'/R_o : а – $H_w/R_o = 15$; б –

Из рисунка 4 видно, что в рассматриваемых случаях нормальные тангенциальные напряжения при увеличении относительной высоты налегающей толщи возрастают практически по линейному закону, причем сжимающие напряжения в угловых точках лотка обделок (точки 3 и 3') увеличиваются в 1.5–1.8 раза. В центре лотка обделки (точка 4) возникают растягивающие напряжения, которые увеличиваются с ростом глубины заложения тоннелей.

Для изучения влияния относительной ширины целика a/R_o между рассматриваемыми тоннелями на нормальные тангенциальные напряжения, были выполнены многовариантные расчеты при отношении модулей деформации пород и материала обделок $\beta = 0.05$ и относительной глубине водоема $H_w/R_o = 15$. При этом принимались следующие значения относительной высоты налегающей толщи: $H'/R_o = 1$ и $H'/R_o = 15$.

На рисунке 5 даны зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$, возникающих на внутренних контурах обделок тоннелей, от относительной ширины целика a/R_o для характерных точек внутренних контуров подземных конструкций (пунктирными линиями показаны аналогичные напряжения $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ в обделке одиночного тоннеля).

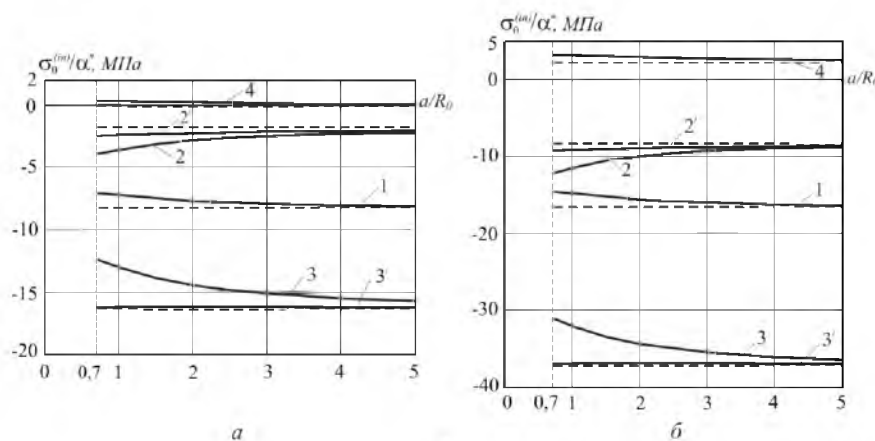


Рис. 5. Зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от относительной ширины целика a/R_o : а – при $H'/R_o = 1$; б – при $H'/R_o = 15$

Fig. 5. Dependencies of stresses $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ on the relative length of pillar a/R_o : а – $H'/R_o = 1$; б – при $H'/R_o = 15$

Из приведенных зависимостей видно, что взаимное влияние тоннелей на напряженное состояние их обделок уменьшается с увеличением относительной ширины целика между ними, при этом значения сжимающих напряжений в своде (точка 1) и угловой точке контура (точка 3) возрастают в 1.2–1.4 раза. Следует отметить, что в этом случае сжимающие напряжения, возникающие в пяте свода (точка 2), снижаются в 1.5–2 раза.



Увеличение относительной высоты налегающей толщи H'/R_o приводит к росту растягивающих напряжений в середине лотка (точке 4) рассматриваемых обделок.

Сравнительную оценку влияния относительной глубины пересекаемого водоема H_w/R_o на напряжения $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ при отношении $\beta = 0.05$ и значениях относительной высоты налегающей толщи $H'/R_o = 1; 15$ можно произвести на основе рисунка 6, где представлены зависимости нормальных тангенциальных напряжений от величины H_w/R_o в точках контуров, номера которых даны на рисунке 3 б.

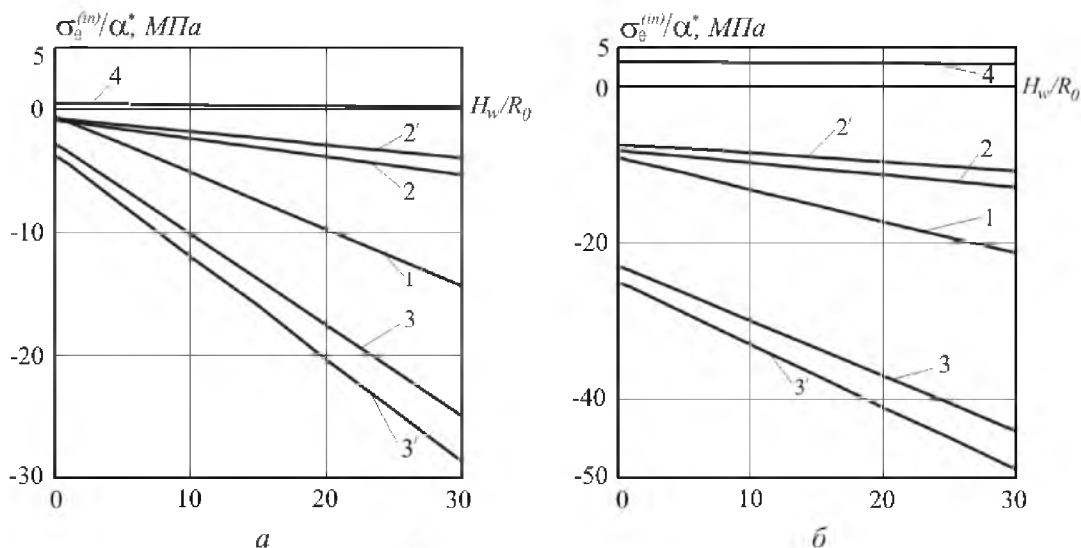


Рис. 6. Зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от относительной глубины пересекаемого водоема H_w/R_o : а – при $H'/R_o = 1$; б – при $H'/R_o = 15$

Fig. 6. Dependencies of stresses $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ on the relative depth of water body H_w/R_o : а – $H'/R_o = 1$; б – $H'/R_o = 15$

Из рисунка 6 следует, что сжимающие напряжения в обделках тоннелей с увеличением относительной глубины водоема увеличиваются по линейному закону, а растягивающие напряжения, возникающие в точке 4 лотка снижаются до нуля в случае мелкого заложения тоннелей ($H'/R_o = 1$) и постоянны при значении $H'/R_o = 15$.

Для изучения влияния отношения модулей деформации массива пород и бетона $\beta = E_o/E_t$ на напряженное состояние обделок при значениях относительной глубины налегающей толщи $H'/R_o = 1, 15$ и относительной глубине водоема $H_w/R_o = 15$.

Ниже, на рисунке 7, приведены зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от отношения β при значениях относительной высоты налегающей толщи $H_w/R_o = 1$ и $H'/R_o = 15$ (номера кривых соответствуют номерам точек на внутренних контурах сечений обделок).

Из представленных на рисунке 7 зависимостей видно, что сжимающие напряжения $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ в своде и угловых точках лотка снижаются с увеличением отношения β , при этом растягивающие напряжения, возникающие в пятах свода и центре лотка, меняют знак и становятся сжимающими.

С целью исследования влияния толщины обделок Δ на нормальные тангенциальные напряжения производились расчеты конструкций при отношении $\beta = 0,05$, относительной глубине пересекаемого водоема $H_w/R_o = 15$ и разных значениях глубины заложения тоннелей $H = 9$ м, 70 м (рис. 8).

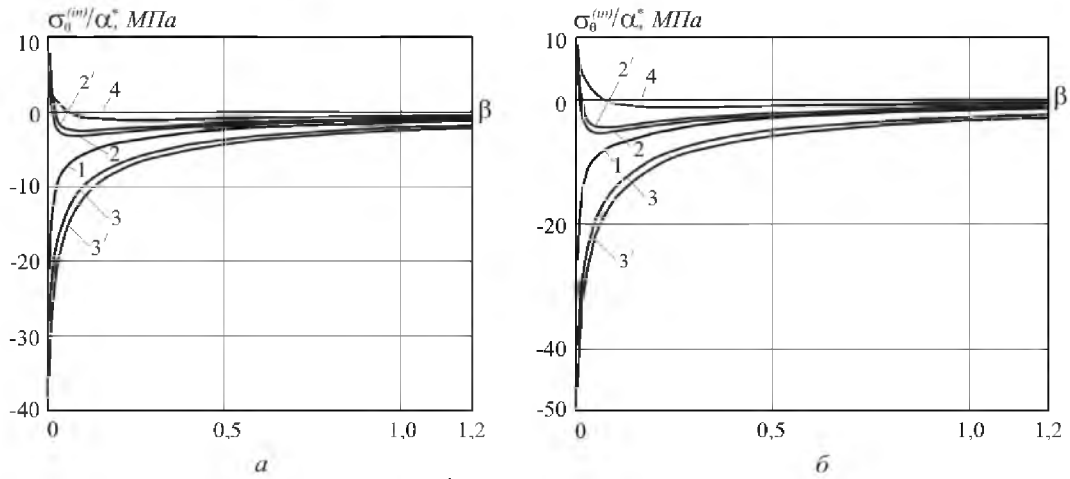


Рис. 7. Зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от отношения модулей деформации $\beta = E_o/E_l$: а – при $H'/R_o = 1$; б – при $H'/R_o = 15$

Fig. 7. Dependencies of stresses $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ on the ratio of deformation modules $\beta = E_o/E_l$: а – $H'/R_o = 1$; б – $H'/R_o = 15$

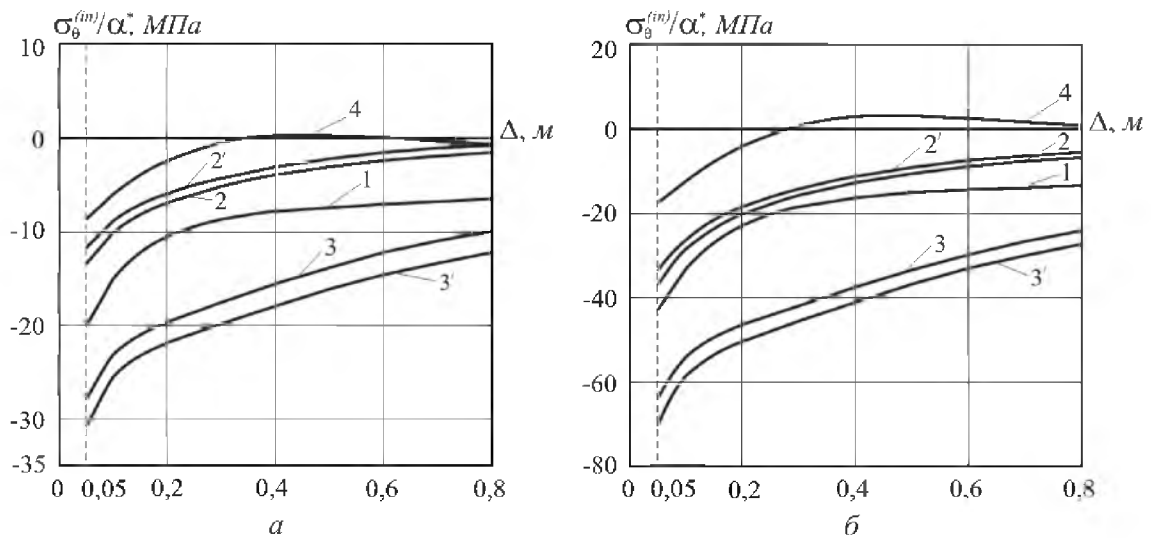


Рис. 8. Зависимости напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ от толщины обделок Δ : а – при $H = 9$ м; б – при $H = 70$ м

Fig. 8. Dependencies of stresses $\sigma_{\theta}^{(in)}/\alpha^*$ on the linings thickness Δ : а – $H = 9$ м; б – $H = 70$ м

Как видно из рисунка 8, увеличение толщины обделок Δ приводит к снижению нормальных тангенциальных напряжений, причем в точке 4 внутренних контуров сжимающие напряжения меняют знак при значении $\Delta = 0.3$ м и становятся растягивающими, возрастают, а затем, при $\Delta = 0.5$ и выше – снижаются. В случае мелкого заложения тоннелей (см. рис. 8 а) растягивающие напряжения вновь приобретают знак «минус» в диапазоне значений Δ от 0.6 м до 0.8 м.

Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что близко расположенные подземные сооружения существенно влияют на напряженное состояние обделок подводных тоннелей, пройденных в слабых обводненных породах ($\beta = 0,05$). Так, в ряде рассмотренных случаев, сжимающие нормальные тангенциальные напряжения, возникающие в пяте свода конструкций со стороны целика между тоннелями, превышают в 1,5 - 2 раза аналогичные напряжения, полученные в обделках без учета влияния соседнего тоннеля.



Следует также отметить наличие в лотках обделок тоннелей растягивающих напряжений, величину которых необходимо принимать во внимание при оценке несущей способности проектируемых конструкций.

Список литературы References

1. Араманович И.Г. 1955. Распределение напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием. В кн.: Доклады АН СССР. Вып. 104. №3: 372–375.
Aramanovich I.G. 1955. The stress distribution in an elastic half-plane, supported by a weaker circular hole. In: Doklady AN SSSR. Vyp. 104. №3 [Reports of the USSR Academy of Sciences. Vol. 104. №3]: 372–375. (in Russian)
2. Воронина И.Ю. 2010. Расчет обделок параллельных подводных тоннелей произвольного поперечного сечения. В кн.: Теория и практика геомеханики для повышения эффективности горного производства и строительства. Труды IV Международной конференции по геомеханике (г. Варна, 3–6 июня 2010). Варна: 323–330.
Voronina I.Ju. 2010. Calculation lining parallel underwater tunnels with arbitrary cross-section. In: Teorija i praktika geomehaniki dlja povyshenija jeffektivnosti gornogo proizvodstva i stroitel'stva. Trudy IV Mezhdunarodnoj konferencii po geomehanike (g. Varna, 3–6 ijunja 2010) [Proceeding of the IV International geomechanics conference (Varna, 3-6 June 2010)]. Varna: 323–330. (in Russian)
3. Воронина И.Ю. 2013. Расчет обделок параллельных подводных тоннелей произвольного поперечного сечения с учетом влияния ползучести пород. В кн.: Форум гірників – 2013. Матеріали міжнародної конференції (м. Дніпропетровськ, 2–5 жовтня 2013 р.). Т. 2. Дніпропетровськ, Національний горничий університет: 153–157.
Voronina I.Ju. 2013. Calculation lining parallel underwater tunnels with arbitrary cross-sectional view of the influence of rock creep. In: Forum girnikiv – 2013. Materiali mizhdunarodnoj konferencii (m. Dnipropetrovsk, 2–5 zhovtn'ja 2013 r.). T. 2. [Miners Forum – 2013 Conference Papers (Dnepropetrovsk, October 2-5, 2013). Vol. 2] Dnipropetrovsk, Nacional'nyj gornichij universitet: 153–157. (in Russian)
4. Воронина И.Ю., Деев П.В. 2006. Расчет обделок подводных тоннелей произвольного поперечного сечения. Известия ТулГУ. Геомеханика. Механика подземных сооружений, 4: 62–68.
Voronina I.Ju., Deev P.V. 2006. Calculation lining undersea tunnels with arbitrary cross-section. Izvestija TulGU. Geomehanika. Mehanika podzemnyh sooruzhenij, 4: 62–68. (in Russian)
5. Мусхелишвили Н.И. 1966. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Наука, 707.
Mushelishvili N.I. 1966. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 707. (in Russian)
6. Фотиева Н.Н., Козлов А.Н. 1992. Расчет крепи параллельных выработок в сейсмических районах. М., Недра, 231.
Fotieva N.N., Kozlov A.N. 1992. Raschet krepj parallel'nyh vyrabotok v sejsmicheskikh rajonah [Design of the parallel developments lining in seismic regions]. Moscow, Nedra, 231. (in Russian)
8. Шерман Д.И. 1951. О напряжениях в плоской весомой среде с двумя одинаковыми симметрично расположенными круговыми отверстиями. ПММ, XV (6): 751–761.
Sherman D.I. 1951. About stresses in a plane weighty medinm with two identical symmetrically arranged circular openings. PMM, XV (6): 751–761. (in Russian)
9. Fotieva N.N., Voronina I.Yu. 2004. Study of parallel undersea or under-river tunnel linings stress state. In: Proceedings of the VIIIth Regional Rock Mechanics Symposium 2004. Sivas, Turkiye: 389–393.