

ВЛИЯНИЕ УКРЕПИТЕЛЬНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТА И ОЧЕРЕДНОСТИ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИХ ОБДЕЛОК

*С. В. Анциферов, Л. Н. Анциферова,
С. О. Золотарев, В. Г. Дворянкин
Тульский государственный университет,
г. Тула (Россия)*

В практике подземного строительства для преодоления участков не-связных водонасыщенных и нарушенных скальных грунтов, ликвидации водопритоков в подземные выработки и сооружения, уменьшения влияния горных работ на основания и фундаменты объектов, находящихся в зоне влияния строительства, используют специальные способы строительства. Одним из них является инъекционный метод укрепления грунта, который при использовании материалов на основе минеральных вяжущих (цементной основе), называют укрепительной цементацией. В результате предварительного нагнетания под давлением в грунт инъекционного раствора создаются более благоприятные условия для сооружения тоннелей, в том числе – изменяются физико-механические характеристики грунта. Этим достигается водонепроницаемость грунтов со значительными водопритоками, повышается прочность, несущая способность грунтов, их стабильность и устойчивость.

В зависимости от инженерно-геологических условий проходки тоннелей, объема работ, габаритов и технических характеристик оборудования реализуется одна из технологических схем производства работ по инъекционному укреплению грунта цементационными растворами:

- путем подачи укрепляющего раствора с дневной поверхности по трубопроводам, проложенным к участку инъекционных работ;
- из подземной выработки с размещением бурового и инъекционного оборудования в забое в один или несколько этапов при протяженной зоне неустойчивых грунтов с чередованием фаз укрепления и проходки.

Ниже приведено исследование напряженного состояния обделок двух параллельных коллекторных тоннелей, сооружаемых с применением предварительного инъекционного укрепления окружающего грунта, учитывающее влияние технологии сооружения тоннелей – очередности их проходки, отставание монтажа обделок от забоя выработок, а также взаимное расположение тоннелей по отношению к дневной поверхности.

Приведенные в работе результаты получены с использованием разработанного в ТулГУ метода расчета обделок, в том числе – многослойных, параллельных близко расположенных тоннелей мелкого заложения круглого поперечного сечения, сооружаемых с применением инъекционного укрепления грунта, на статические нагрузки [1–3], реализованного

в виде алгоритма и компьютерной программы, позволяющей производить многовариантные расчеты в целях практического проектирования [4].

В основу этого метода положены новые аналитические решения соответствующих задач теории упругости для линейно-деформируемой полуплоскости, моделирующей массив грунта, ослабленной конечным числом круговых отверстий, подкрепленных многослойными кольцами. Наружные слои колец моделируют зоны грунта вокруг обделок, подверженного инъекционному укреплению, а остальные слои – конструкции обделок тоннелей.

Задачи теории упругости после введения комплексных потенциалов, характеризующих напряженно-деформированное состояние областей, моделирующих массив грунта, зоны укрепленного грунта и обделки тоннелей, сводятся к краевым задачам теории аналитических функций комплексного переменного [5; 6], решаемым, в свою очередь, с применением аппарата аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости, интегралов типа Коши и комплексных рядов.

Представленные исследования базируются на рассмотрении задачи, в которой линейно-деформируемая весома однородная изотропная полубесконечная среда ослаблена двумя подкрепленными круговыми отверстиями, моделирующими достаточно протяженные параллельные участки тоннелей в зонах грунта с измененными деформационными характеристиками. Расчетная схема задачи приведена на рисунке 1.

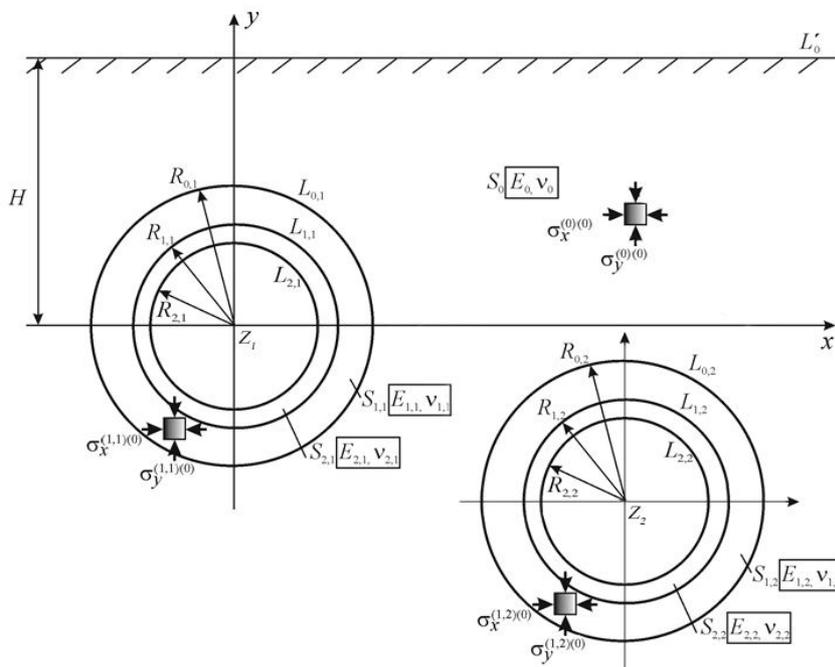


Рис. 1. Расчетная схема

Среда S_0 , моделирующая массив грунта с деформационными характеристиками – модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , ограничена прямой L_0' и контурами $L_{1,m}$ отверстий, радиусами $R_{1,m}$, центры которых расположены произвольным образом в точках плоскости $z_m = x_m + iy_m$ ($m=1,2$). Начало отсчета прямоугольной декартовой системы координат совмещено с центром первого отверстия. Здесь и далее символом « i » обозначается мнимая единица в отличие от « i » – номера контура.

Отверстия подкреплены кольцами $S_{2,m}$ с внутренними контурами $L_{2,m}$, радиусами $R_{2,m}$, выполненными из материалов с деформационными характеристиками $E_{2,m}$, $\nu_{2,m}$ ($m=1,2$) и моделирующими монолитные или железобетонные обделки тоннелей. Наружные по отношению к контурам $L_{1,m}$ кольца $S_{1,m}$ ($m=1,2$) с деформационными характеристиками $E_{1,m}$, $\nu_{1,m}$ ($m=1,2$) моделируют слои грунта вокруг тоннелей, подверженного инъекционному укреплению. Среда S_0 и кольца $S_{i,m}$ ($i=1,2$; $m=1,2$) деформируются совместно, т. е. на линиях контакта $L_{i,m}$ ($i=0,1$; $m=1,2$) выполняются условия непрерывности векторов смещений и полных напряжений. Граница L_0' и внутренние контуры $L_{2,m}$ ($m=1,2$) свободны от действия внешних сил.

Действие собственного веса грунта моделируется наличием в среде S_0 и в кольцах $S_{1,m}$ ($m=1,2$) поля начальных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(0)(0)} = \sigma_x^{(1,m)(0)} = -\lambda\gamma(H_m - y), \quad \sigma_y^{(0)(0)} = \sigma_y^{(1,m)(0)} = -\gamma(H_m - y), \\ \tau_{xy}^{(0)(0)} = \tau_{xy}^{(1,m)(0)} = 0 \end{aligned}, \quad (1)$$

где γ – удельный вес грунта, λ – коэффициент бокового давления грунта в ненарушенном массиве, H_m – расстояние от прямолинейной границы до центра m -го отверстия.

Полные напряжения $\sigma_x^{(0)*}$, $\sigma_y^{(0)*}$, $\tau_{xy}^{(0)*}$ в среде S_0 , а также полные напряжения $\sigma_x^{(1,m)*}$, $\sigma_y^{(1,m)*}$, $\tau_{xy}^{(1,m)*}$ в областях $S_{1,m}$ ($m=1,2$) представляются в виде сумм:

$$\sigma_x^{(0)*} = \sigma_x^{(0)(0)} + \sigma_x^{(0)}, \quad \sigma_y^{(0)*} = \sigma_y^{(0)(0)} + \sigma_y^{(0)}, \quad \tau_{xy}^{(0)*} = \tau_{xy}^{(0)(0)} + \tau_{xy}^{(0)}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(1,m)*} = \sigma_x^{(1,m)(0)} + \sigma_x^{(1,m)}, \quad \sigma_y^{(1,m)*} = \sigma_y^{(1,m)(0)} + \sigma_y^{(1,m)} \\ \tau_{xy}^{(1,m)*} = \tau_{xy}^{(1,m)(0)} + \tau_{xy}^{(1,m)} \end{aligned}, \quad (3)$$

где $\sigma_x^{(0)}$, $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$, $\sigma_x^{(1,m)}$, $\sigma_y^{(1,m)}$, $\tau_{xy}^{(1,m)}$ – дополнительные горизонтальные, вертикальные и касательные напряжения в областях S_0 и $S_{1,m}$ ($m=1,2$) соответственно, обусловленные наличием подкрепленных отверстий.

Смещения рассматриваются только дополнительные. Начальные напряжения в кольцах $S_{2,m}$ ($m=1,2$) полагаются равными нулю, т. е. вес обделок не учитывается.

Граничные условия задачи имеют вид:

$$\sigma_y^{(0)} = 0, \tau_{xy}^{(0)} = 0 \text{ на } L_0', \quad (4)$$

$$\sigma_r^{(1,m)} = \sigma_r^{(0)(0,m)} + \sigma_r^{(0,m)}, \quad \tau_{r\theta}^{(1,m)} = \tau_{r\theta}^{(0)(0,m)} + \tau_{r\theta}^{(0,m)} \text{ на } L_{0,m} \text{ (} m=1,2 \text{), (5)}$$

$$u_x^{(1,m)} = u_x^{(0,m)}, \quad u_y^{(1,m)} = u_y^{(0,m)}$$

$$\sigma_r^{(2,m)} = \sigma_r^{(0)(1,m)} + \sigma_r^{(1,m)}, \quad \tau_{r\theta}^{(2,m)} = \tau_{r\theta}^{(0)(1,m)} + \tau_{r\theta}^{(1,m)} \text{ на } L_{1,m} \text{ (} m=1,2 \text{), (6)}$$

$$u_x^{(2,m)} = u_x^{(1,m)}, \quad u_y^{(2,m)} = u_y^{(1,m)}$$

$$\sigma_r^{(2,m)} = 0, \tau_{r\theta}^{(2,m)} = 0 \text{ на } L_{2,m} \text{ (} m=1,2 \text{). (7)}$$

В условиях (4)–(7) $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ – полные (одновременно дополнительные, т. к. соответствующие начальные напряжения в этих точках отсутствуют) вертикальные и касательные напряжения в точках границы L_0' в декартовой системе координат, $u_x^{(i,m)}$, $u_y^{(i,m)}$ ($i=0,1,2$) – дополнительные горизонтальные и вертикальные смещения точек контуров $L_{i,m}$ ($i=0,1,2$), $\sigma_r^{(i,m)}$, $\tau_{r\theta}^{(i,m)}$ ($i=0,1,2$) – дополнительные радиальные и касательные напряжения в точках контуров $L_{i,m}$ ($i=0,1,2; m=1,2$) в полярной системе координат, $\sigma_r^{(1,m)(0)}$, $\tau_{r\theta}^{(1,m)(0)}$ – начальные радиальные и касательные напряжения в точках контуров $L_{1,m}$ ($m=1,2$).

Приведенная постановка задачи позволяет учитывать основные факторы, оказывающие влияние на напряженное состояние обделок тоннелей: взаимное расположение тоннелей по отношению к земной поверхности; размеры поперечных сечений тоннелей; глубину заложения и толщину обделки каждого из тоннелей; деформационные характеристики материалов обделок; наличие зон грунта вокруг тоннелей, подверженного укреплению, их поперечные размеры и деформационные характеристики; последовательность сооружения тоннелей, а также отставание возведения обделки

от забоя в каждом из тоннелей; реологические свойства грунта в рамках теории линейной наследственной ползучести.

Ниже приведены результаты оценки напряженного состояния бетонных обделок вертикально расположенных тоннелей и массива грунта с учетом последовательности (очередности) проходки тоннелей и отставания возведения монолитных бетонных обделок от забоя для случая, когда первым проходится нижний тоннель, который крепится с отставанием $l = 2 \text{ м}$, а затем проходится и крепится с тем же отставанием верхний тоннель. Исходные данные для расчета: $H_1 = 9 \text{ м}$, $H_2 = 21 \text{ м}$; $R_{0,1} = R_{0,2} = 5,5 \text{ м}$, $R_{1,1} = R_{1,2} = 2,8 \text{ м}$, $R_{2,1} = R_{2,2} = 2,5 \text{ м}$; $\lambda = 0,54$, $\gamma = 0,017 \text{ МН/м}^3$, $E_0 = 100 \text{ МПа}$, $\nu_0 = 0,35$; $E_{1,1} = E_{2,1} = 250 \text{ МПа}$, $\nu_{1,1} = \nu_{2,1} = 0,35$; $E_{1,2} = E_{2,2} = 23000 \text{ МПа}$, $\nu_{1,2} = \nu_{2,2} = 0,2$.

На рисунке 2 приведены расчетная схема (рис. 2 а) и эпюра нормальных тангенциальных напряжений σ_θ (рис. 2 б), возникающих в упрочненном грунте на внутреннем контуре сечения выработки тоннеля. Расчеты показывают, что во всех точках контура возникают сжимающие напряжения, максимальное значение которых достигает $\sigma_\theta^{\max} = -0,77 \text{ МПа}$.

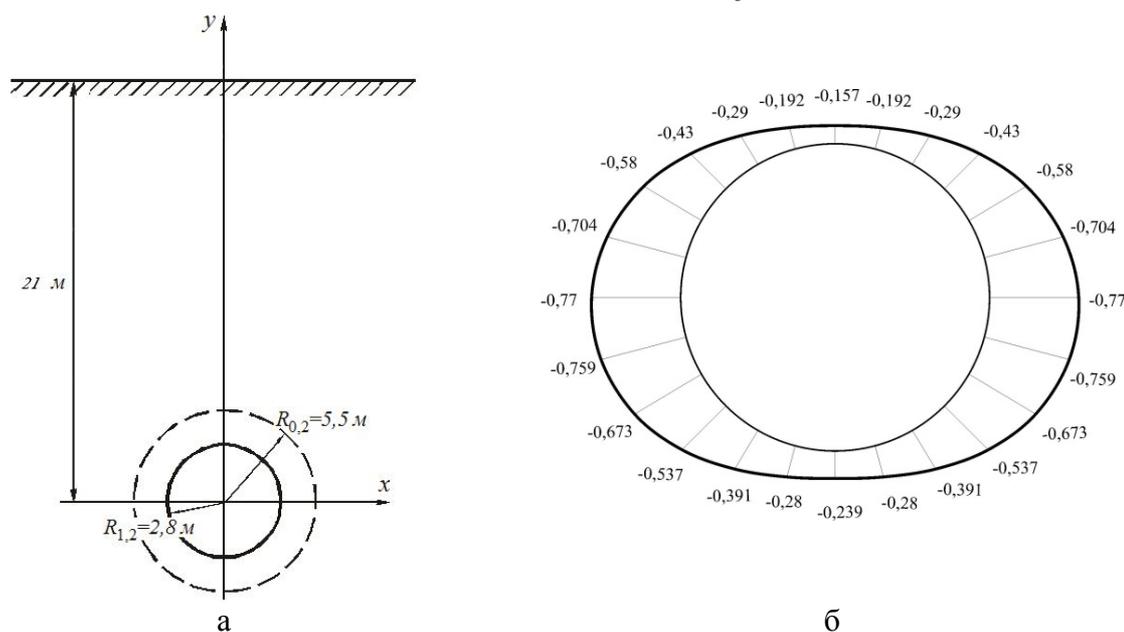


Рис. 2. Расчетная схема (а) и эпюра напряжений σ_θ , МПа, возникающих на внутреннем контуре упрочненного слоя грунта (б)

На рисунке 3 изображена расчетная схема (рис. 3 а) и приведена эпюра напряжений σ_θ (рис. 3 б), возникающих на внутреннем контуре бетонной обделки первого (нижнего) тоннеля, с учетом заданного отставания обделки от забоя. Максимальные сжимающие напряжения составляют $\sigma_\theta^{\max} = -2,091 \text{ МПа}$ (точки горизонтального диаметра выработки), в точках

свода и лотка обделки возникают растягивающие напряжения, достигающие $\sigma_{\theta}^{\max} = 0,392 \text{ МПа}$.

На рисунке 4 приведены расчетная схема (рис. 4 а), эпюры напряжений, возникающих на внутреннем контуре бетонной обделки нижнего тоннеля, возникающие после проходки выработки второго (верхнего) тоннеля (рис. 4 б), а также эпюра напряжений, возникающих в грунте на внутреннем контуре сечения выработки верхнего тоннеля (рис. 4 в). Из представленных результатов следует, что проходка верхнего тоннеля оказывает существенное влияние на напряженное состояние обделки нижнего тоннеля: исчезают растягивающие напряжения, значительно уменьшаются сжимающие напряжения, например для максимальных значений с $\sigma_{\theta}^{\max} = -2,091 \text{ МПа}$ до $\sigma_{\theta}^{\max} = -1,222 \text{ МПа}$.

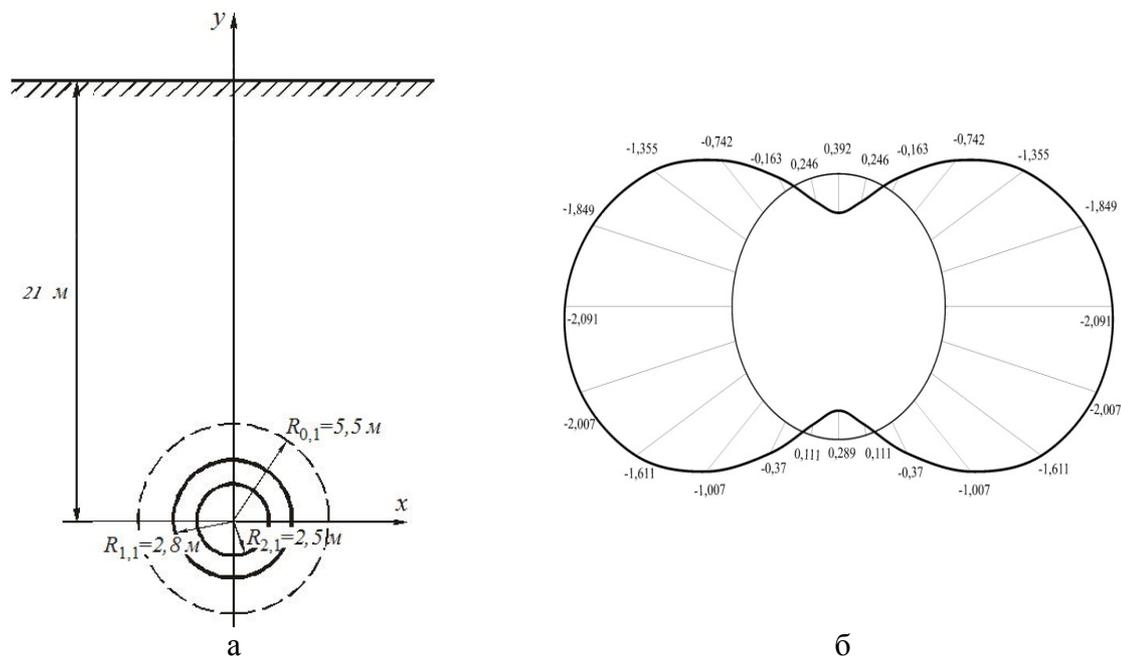


Рис. 3. Расчетная схема (а) и эпюра напряжений σ_{θ} , МПа, возникающих в точках внутреннего контура обделки тоннеля (б)

В массиве грунта максимальные сжимающие напряжения наблюдаются в точках горизонтального диаметра контура выработки и составляют $\sigma_{\theta}^{\max} = -0,423 \text{ МПа}$, максимальные растягивающие напряжения (в своде тоннеля) уменьшились в 4,5 раз, достигнув значения $\sigma_{\theta}^{\max} = 0,086 \text{ МПа}$, в лотке тоннеля полностью исчезли растягивающие напряжения, а сжимающие напряжения составляют $\sigma_{\theta} = -0,04 \text{ МПа}$.

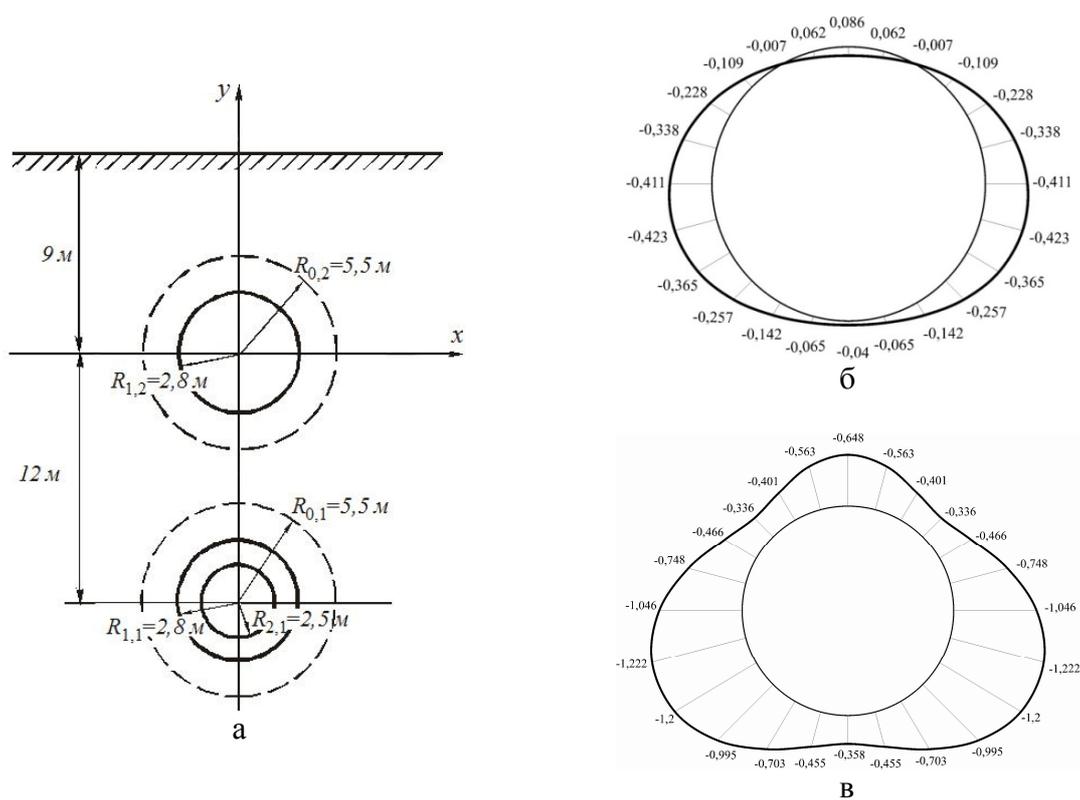


Рис. 4. Расчетная схема (а) и эпюры напряжений σ_θ , МПа на внутреннем контуре упрочненного слоя грунта для верхнего тоннеля (б) и на внутреннем контуре обделки нижнего тоннеля (в)

На рисунке 5 приведены расчетная схема и эпюры нормальных тангенциальных напряжений σ_θ , возникающих на внутреннем контуре бетонной обделки верхнего тоннеля, возведенной с заданным отставанием, а также эпюра напряжений σ_θ , возникающих на внутреннем контуре сечения обделки нижнего тоннеля после возведения обделки в верхнем тоннеле.

Как следует из анализа полученных результатов, наиболее неблагоприятное напряженное состояние обделки нижнего тоннеля наблюдается до проходки и крепления второго тоннеля, т. е. сооружение верхнего тоннеля, включающее в себя этапы проходки выработки и возведения обделки с определенным отставанием последовательно снижают значения напряжений в обделке нижнего тоннеля.

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что при различных вариантах проходки необходимо производить анализ напряженного состояния каждой конструкции на каждом этапе производства работ, так как предусмотреть заранее наиболее благоприятный случай даже для двух тоннелей является достаточно сложной задачей.

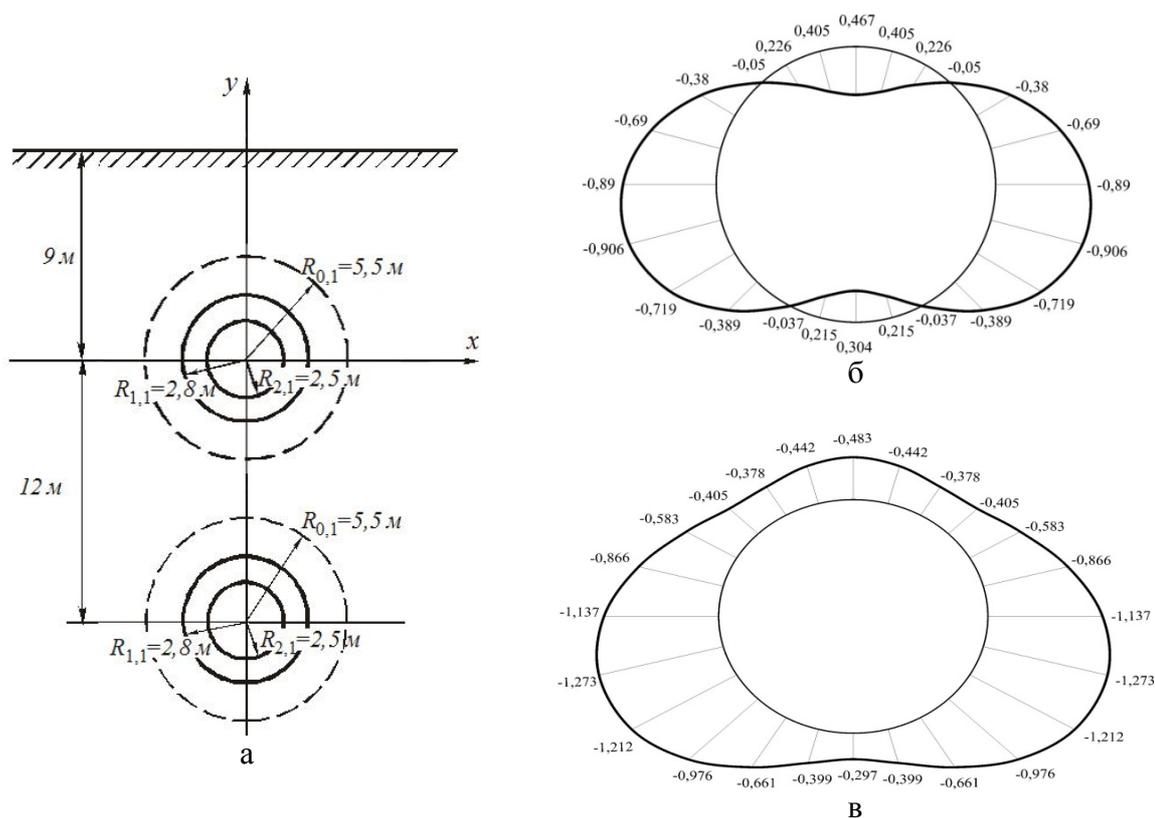


Рис. 5. Расчетная схема (а), эпюры напряжений σ_θ , МПа на внутреннем контуре обделки в верхнем тоннеле (б) и на внутреннем контуре обделки в нижнем тоннеле (в) после сооружения обделки в верхнем тоннеле

Следует отметить, что приведенные в работе результаты анализа напряженного состояния обделок тоннелей получены на основе многовариантных расчетов, выполненных с использованием разработанного в ТулГУ программного комплекса. Эти программы, помимо расчета на действие собственного веса грунта, позволяют производить определение напряженного состояния многослойных обделок конечного числа параллельных близко расположенных тоннелей кругового поперечного сечения, центры поперечных сечений которых расположены произвольно, сооруженных закрытым способом вблизи земной поверхности, в сильно обводненных грунтах (действие веса грунтовых вод), при наличии в тоннелях внутреннего давления (для напорных тоннелей или тоннелей ливневой канализации) с учетом веса воды, заполняющей тоннели, а также при действии веса зданий, сооружений или транспортных средств на поверхности [4].

Список литературы

1. Анциферов, С. В. Метод расчета многослойных обделок параллельных взаимовлияющих тоннелей мелкого заложения / С. В. Анциферов // Известия ТулГУ. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 22–36. – Сер. «Геомеханика. Механика подземных сооружений».
2. Анциферов, С. В. Метод расчета многослойных обделок комплекса параллельных круговых тоннелей мелкого заложения / С. В. Анциферов // Тоннельное строитель-

ство России и стран СНГ в начале века: опыт и перспективы : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. 28–31 октября 2002 г. – М., 2002. – С. 367–370.

3. Анциферов, С. В. Исследование напряженного состояния обделок тоннелей ливневой канализации, сооруженных с использованием предварительной цементации грунта / С. В. Анциферов // Известия ТулГУ. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 246–253. – Сер. «Экология и рациональное природопользование».

4. Анциферов, С. В. Разработка программного обеспечения для определения напряженного состояния многослойных обделок тоннелей мелкого заложения / С. В. Анциферов, Л. Н. Анциферова, В. М. Логунов, М. Б. Цудиков // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте : мат-лы IV Междунар. конф. 29–30 июня 1999 г. – СПб., 1999. – С. 151–157.

5. Араманович, И. Г. О распределении напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием / И. Г. Араманович // Докл. АН СССР. – М., 1955. – Т. 104, № 3. – С. 372–375.

6. Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М. : Наука, 1964. – 604 с.