© С.В. Анциферов, 2008

УДК 621.9

С.В. Анциферов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ, СООРУЖЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНЪЕКЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТА

Приведены результаты исследования напряженного состояния обделок трех параллельных круговых транспортных тоннелей, сооружаемых с применением инъекционного укрепления грунта.

Семинар № 18

Исследование напряженного состояния обделок трех близко расположенных транспортных тоннелей, сооруженных закрытым способом с применением инъекционного укрепления грунта, от основных влияющих факторов при действии собственного веса грунта выполнено с использованием компьютерной программы, реализующей разработанный в ТулГУ аналитический метод расчета многослойных обделок взаимовлияющих параллельных круговых тоннелей мелкого заложения на статические нагрузки [3-5].

В основу метода расчета обделок тоннелей на действие собственного веса грунта, давления грунтовых вод, внутреннего давления воды, нагрузок, моделирующих вес зданий, сооружений или транспортных средств на поверхности, положены аналитические решения соответствующих плоских контактных задач теории упругости [1, 2] для полубесконечной многосвязной весомой линейно-деформи-руемой среды S_0, ослабленной произвольным числом круговых отверстий, центры которых расположены произвольным образом, подкрепленых многослойными кольцами, выполненных из различных материалов.

Ниже приведены основные результаты исследования напряженного состояния обделок трех параллельных круговых транспортных тоннелей – двух основных и одного сервисного, сооружаемых с применением инъекционного укрепления грунта, с часто применяемыми на практике обделками из железобетонных блоков. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Обделки тоннелей, выполненные из высокопрочных и водонепроницаемых железобетонных блоков с перевязкой швов, а также области грунта вокруг тоннелей, подверженные инъекционному укреплению, в расчетной схеме моделировались двуслойными кольцами. Наружные слои из материалов с модулями деформации $E_{1,j}$ $(j=1,2,3)$ и коэффициентами Пуассона $\nu_{1,j}$ $(j=1,2,3)$ моделируют области укрепленного грунта, а внутренние однородные слои из материалов с соответствующими деформационными характеристиками - модулями деформации $E_{2,j}$ $(j=1,2,3)$ и коэффициентами Пуассона $\nu_{2,j}$ $(j=1,2,3)$ моделируют железобетонные обделки.

Ниже приведены общие исходные данные, принятые при расчетах. Тоннели сооружаются щитовым способом

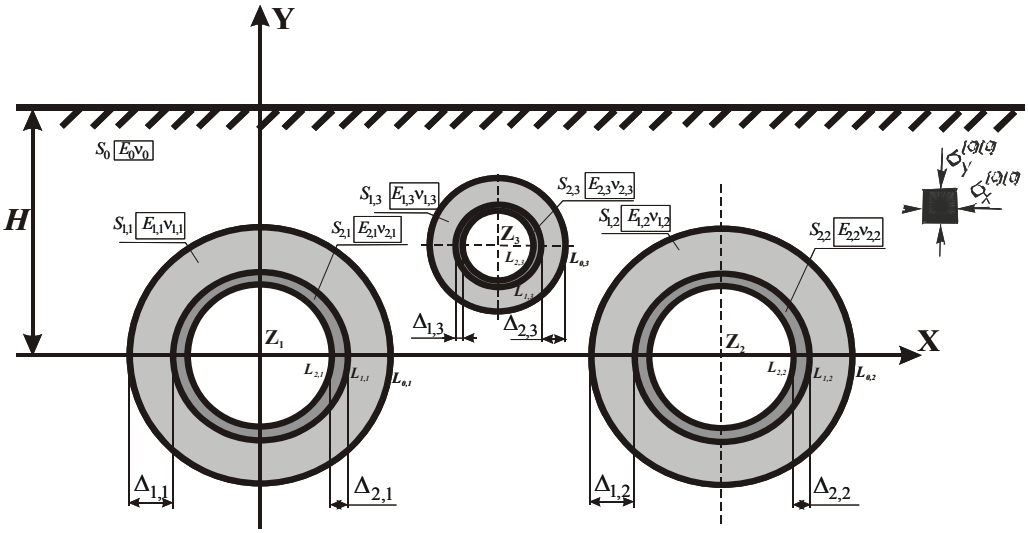

Рис. 1. Расчетная схема

в аллювиальных, песчано-супесчаных грунтах, тугопластических и полутвердых глинах, модуль деформации которых E_0 изменяется в диапазоне $10...500$ МПа, коэффициент Пуассона грунта принят $\nu_0 = 0.35$, объемный вес - $\gamma = 0.02$ Мн/“^{3}. Наружный диаметр обделок основных тоннелей 13.75 м, внутренний - 12.35 м, поэтому приняты $R_{1,1} = R_{1,3} = 6.875$ м, $R_{2,1} = R_{2,3} = 6.175$ м (толщина железобетонных блоков $\Delta_{2,1} = \Delta_{2,3} = 0.70$ м); наружный диаметр сервисного тоннеля 6.0 м, толщина обделки $\Delta_{2,2} = 0.35$ м, следовательно $R_{1,2} = 3.0$ м, $R_{2,2} = 2.65$ м. Обделки тоннелей выполнены из бетона класса *B45* с модулем деформации $E_b = 37500$ МПа ($E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа) и коэффициентом Пуассона $\nu_{2,1} = \nu_{2,2} = \nu_{2,3} = 0.2$ (как варианты рассмотрены случаи использования бетонов класса *B40* с модулем деформации $E_b = 36000$ МПа и класса *B50* с модулем деформации $E_b = 39000$ МПа). Принятая при исследовании расчетная схема соответствует одновременной проходке тоннелей (худший случай) и креплению непосредственно в забое - $\alpha^* = 1$. Остальные исходные данные варьируются.

Расчеты показывают, что наибольшие напряжения имеют место, как правило, в точках внутреннего контура поперечного сечения бетонной обделки. Поэтому выполнялось исследование зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, возникающих в точках внутреннего контура сечения обделки, от основных влияющих факторов - глубины заложения тоннелей H, модуля деформации грунта E_0, толщины Δ укрепленных слоев грунта вокруг тоннелей, расстояний между центрами поперечных сечений тоннелей, положения сервисного тоннеля по отношению к основным, коэффициента бокового давления в ненарушенном массиве грунта.

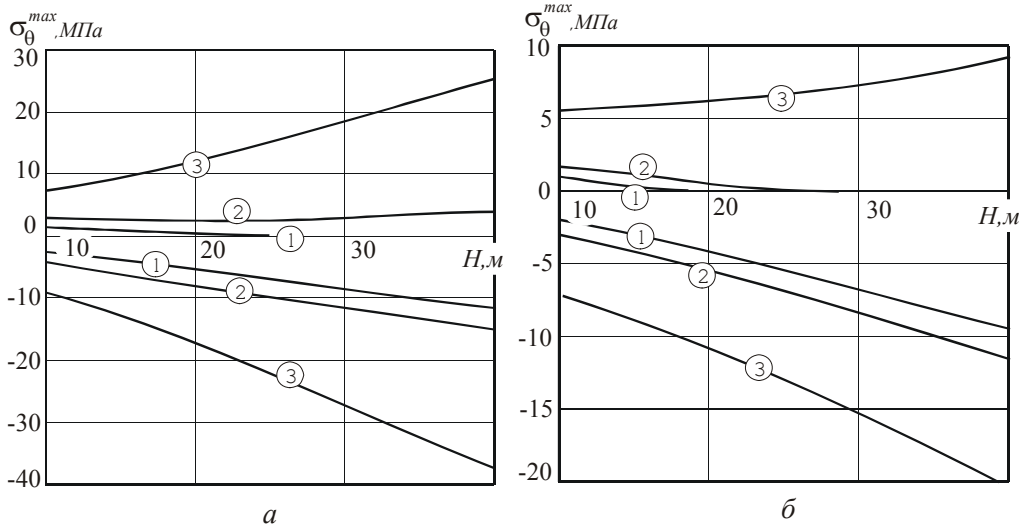

Рис. 2. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа ***в точках внутренних контуров бетонных обделок основных тоннелей (а); сервисного тоннеля (б) от глубины заложения тоннелей*** Н, м*: 1* - $E_0 = 500$ МПа, *2* - $E_0 = 200$ МПа, *3* - $E_0 = 12$ МПа

С целью исследования влияния глубины заложения Н комплекса тоннелей в случае, когда центры поперечных сечений тоннелей лежат на одной горизонтальной прямой, на напряженное состояние бетонных обделок производились расчеты при значениях толщины зоны укрепленного грунта вокруг обделок тоннелей $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 1$ м, модуле деформации и коэффициенте Пуассона укрепленного грунта соответственно $E_{1,1} = E_{1,2} = E_{1,3} = 1000$ МПа, $\nu_{1,1} = \nu_{1,2} = \ = \nu_{1,3} = 0.35$, модуле деформации и коэффициенте Пуассона бетона соответственно $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа, $\nu_{2,1} = \nu_{2,2} = \nu_{2,3} = 0.2$ (бетон *B45*), модуле деформации и коэффициенте Пуассона грунта $E_0 = 500$ МПа, 200 МПа, 10 МПа, $\nu_0 = 0.35$; $\lambda = 0.54$. Расстояние между основными и сервисным тоннелями принято равным 17 м.

Зависимости максимальных растягивающих (положительных) и сжимающих (отрицательных) нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа, возникающих на внутреннем контуре бетонных обделок основных и сервисного тоннелей, от глубины заложения Н показаны соответственно на рис. 2 *а, б.* Номера кривых *1, 2, 3* соответствуют значениям $E_0 = 500$ МПа, 200 МПа, 10 МПа.

Как следует из рис. 2, с увеличением глубины заложения Н максимальные значения сжимающих напряжений в обделках и основных, и сервисного тоннелей возрастают по абсолютной величине во всех рассмотренных случаях. Максимальные растягивающие напряжения в обделках основных и сервисного тоннелей уменьшаются с увеличением глубины при $E_0 = 500$ МПа (линии 1), вплоть до их исчезновения при глубинах заложения, больших 25 м. При $E_0 = 200$ МПа (линии 2) с увеличением

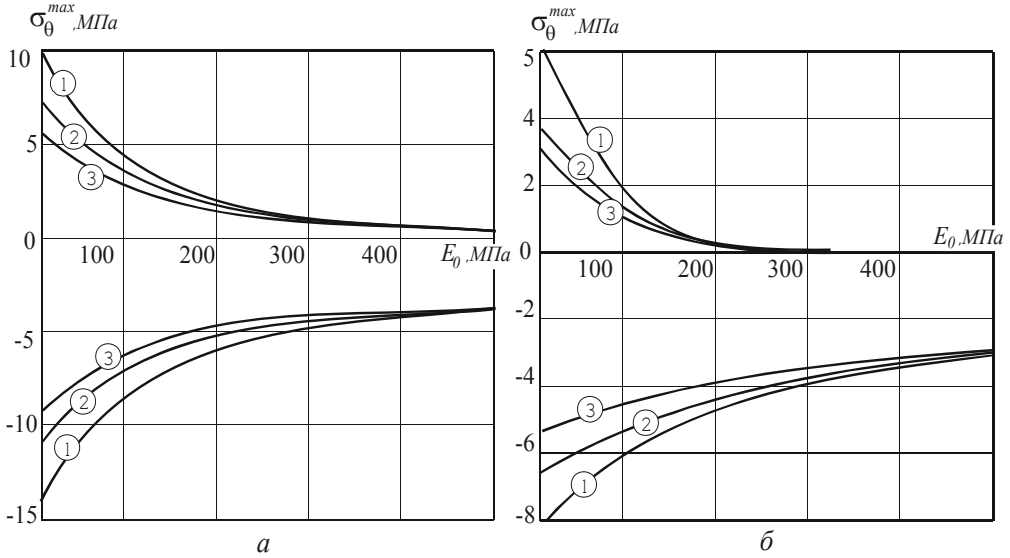

Рис. 3. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа ***в точках внутренних контуров бетонных обделок основных тоннелей (а); сервисного тоннеля (б) от модуля деформации грунта*** E_0, МПа ***:*** *1* - $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 1$ м, *2* - $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 1,5$ м, *3* - $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 2$ м

глубины H до 15...20 м наблюдается уменьшение максимальных растягивающих напряжений (не более 13%), а затем с ростом глубины заложения до $H = 40$ м напряжения возрастают в 1,5 раза, достигая значений 3,04 МПа. Для слабых грунтов ($E_0 = 10$ МПа, линии 3) с ростом глубины заложения тоннелей от 10 до 40 м растягивающие напряжения в обделках основных тоннелей увеличиваются более чем в 3,5 раза, в обделке сервисного – в 1,8 раз.

Для изучения влияния модуля деформации грунта E_0 на напряженное состояние обделок тоннелей из бетона *B45* расчеты производились для трех размеров зон грунтов вокруг тоннелей, подверженных инъекционному укреплению: $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 1$ м (линии 1), $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 1,5$ м (линии 2), $\Delta_{1,1} = \Delta_{1,2} = \Delta_{1,3} = 2$ м (линии 3) с деформационными характеристиками $E_{1,1} = E_{1,2} = E_{1,3} = 1000$ МПа, $\nu_{1,1} = \nu_{1,2} = \nu_{1,3} = 0.35$; $\lambda = 0.54$. Центры поперечных сечений тоннелей расположены на одной горизонтальной прямой, расстояние между основными и сервисным тоннелями принято равным 17 м, глубина заложения тоннелей $H = 15$ м.

На рис. 3 *а, б* показаны полученные зависимости для максимальных растягивающих и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, Мп€, возникающих на внутренних контурах бетонных обделок основных и сервисного тоннелей.

Как следует из рис. 3, с увеличением модуля деформации грунта E_0 нормальные тангенциальные напряжения σ_θ уменьшаются по абсолютной вели-

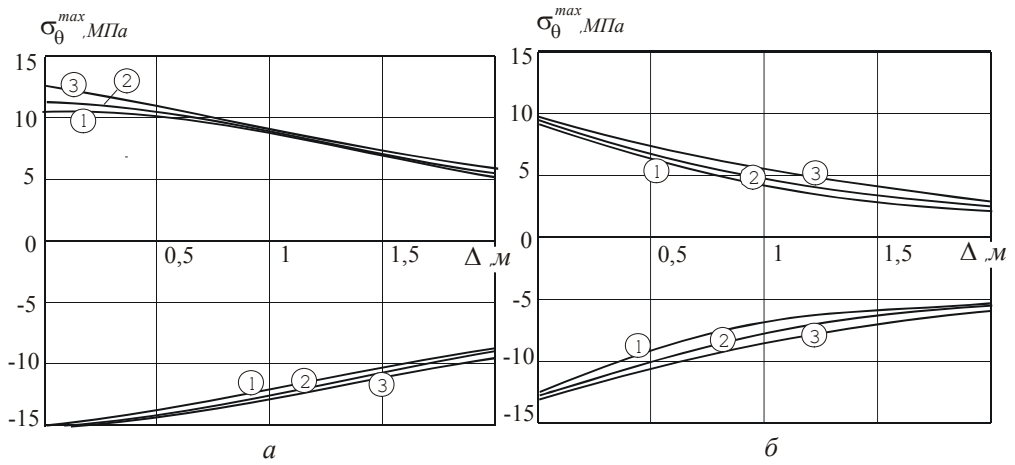

Рис. 4. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа ***в точках внутренних контуров бетонных обделок основных тоннелей (а); сервисного тоннеля (б) от размеров зоны грунта*** Δ, м ***вокруг тоннелей, подверженного инъекционному укреплению:*** *1* - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа, *2* - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа, *3* - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 39000$ МПа

чине как в обделках основных, так и сервисного тоннелей. Это происходит более интенсивно при толщине зоны укрепленного грунта, равной 1 м. Так при изменении E_0 от 10 МПа до 500 МПа максимальные растягивающие напряжения уменьшаются с 9.34 МПа до 3.83 МПа, а сжимающие - с 13.23 МПа до 3.83 МПа (линии 1). Также общим является то, что при фиксированном значении E_0 с увеличением размеров зон укрепленных грунтов напряжения в обделках всех тоннелей уменьшаются, но при значениях модуля деформации грунта $E_0 > 200$ МПа толщина зоны укрепленного грунта практически не влияет на значения максимальных напряжений – отличия не превышают 0.2 МПа.

На рис. 4 представлены зависимости нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, Мпє в точках внутренних контуров поперечных сечений обделок от размеров зоны грунта вокруг тоннелей, подверженного инъекционному укреплению, при этом считается, что толщина этой зоны для каждого из тоннелей одинакова. Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: $E_0 = 20$ МПа, $\nu_0 = 0.35$; $E_{1,1} = E_{1,2} = E_{1,3} = 1000$ МПа, $\nu_{1,1} = \nu_{1,2} = \nu_{1,3} = 0.35$; в качестве модуля деформации материалов слоев, моделирующих обделки тоннелей, приняты модули деформации бетона класса *B40* $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа (линии 1), класса *B45* $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа (линии 2), класса *B50* $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 39000$ МПа (линии 3). Центры поперечных сечений тоннелей расположены на одной горизонтальной прямой, расстояние между основными и

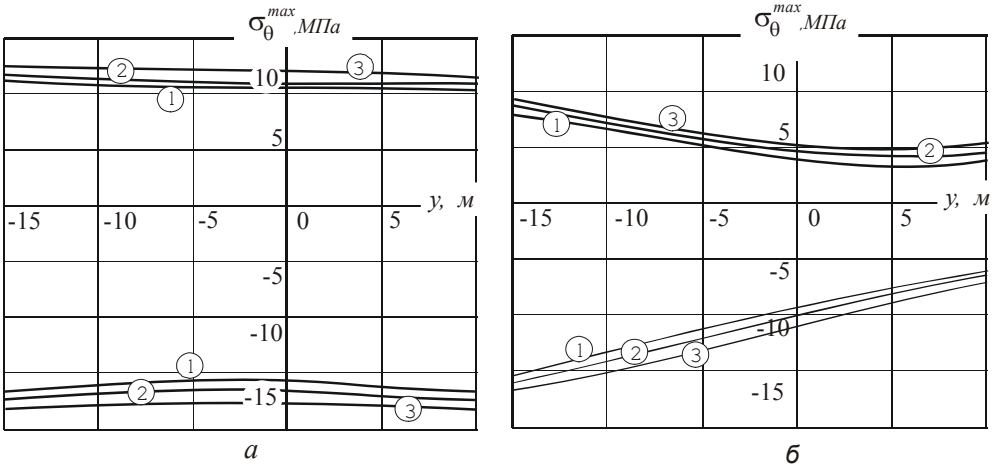

Рис. 5. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа ***в точках внутренних контуров бетонных обделок основных тоннелей (а); сервисного тоннеля (б) от положения сервисного тоннеля:***

1 - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа , *2* - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа ,

3 - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 39000$ МПа

сервисным тоннелями принято равным 17 м, глубина заложения тоннелей $H = 15$ м.

Из зависимостей, приведенных на рис. 4, увеличение толщины Δ зоны укрепленного грунта вокруг тоннелей приводит к существенному снижению максимальных растягивающих и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений в бетонных обделках всех тоннелей. Так, если в обделках основных тоннелей, сооруженных без инъекционного упрочнения максимальные растягивающие напряжения принимали значения от 10.43 МПа (линия 1) до 10.77 МПа (линия 3), то при $\Delta = 2$ м они составляют 4.91 МПа (линия 1) и 5.15 МПа (линия 3). Более существенное снижение напряжений наблюдается в обделке сервисного тоннеля, так при $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа (линии 1) растягивающие напряжения уменьшаются с 9.38 МПа при отсутствии укрепления грунтов до 1.90 МПа при $\Delta = 2$ м. Максимальные сжимающие напряжения в обделках основных тоннелей с увеличением Δ от 0 до 2 м уменьшаются приблизительно в 1.5 раза, в обделке сервисного тоннеля более, чем в 2.5 раза.

На рис. 5 даны зависимости максимальных напряжений σ_θ, МПа в точках внутренних контуров поперечных сечений бетонных обделок тоннелей от положения сервисного тоннеля относительно основных, центры которых расположены на горизонтальной прямой при $H = 20$ м, $E_0 = 20$ МПа для обделок из бетона *B40* - $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа (линии 1), бетона *B45* – $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа (линии 2), бетона *B50* – $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 39000$ МПа (линии 3). Положение сервисного тоннеля меняется по высоте относительно основных тонне-

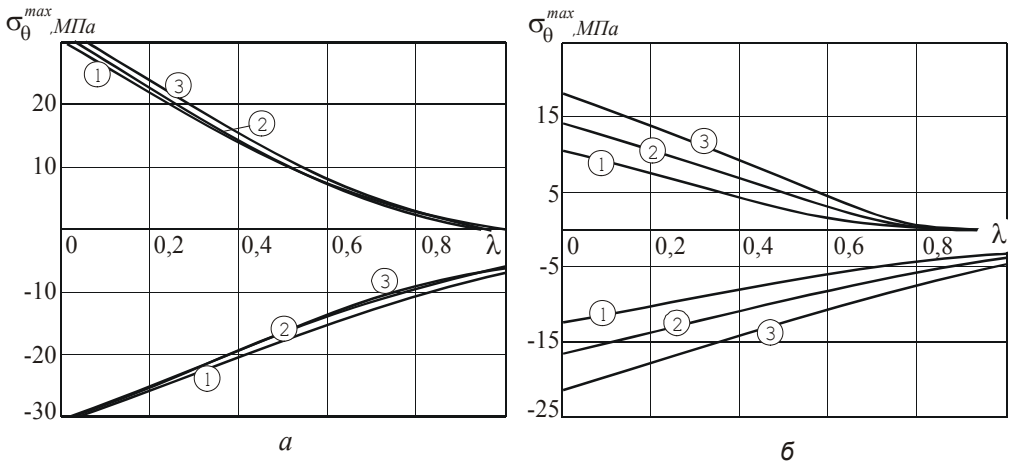

Рис. 6. Зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа ***в точках внутренних контуров бетонных обделок основных тоннелей (а); сервисного тоннеля (б) от коэффициента бокового давления в ненарушенном массиве грунта*** λ ***при различных положениях сервисного тоннеля:*** *1* – выше основных на 5 м, *2* – центры всех тоннелей на одной глубине, *3* - ниже основных на 5 м

лей в диапазоне от –15 м (расположен ниже основных на 15 м) до +5 м (выше основных на 5 м).

Зависимости максимальных сжимающих нормальных тангенциальных напряжений σ_θ, МПа от положения сервисного тоннеля, полученные для основных тоннелей (рис. 5, *а*), имеют экстремальный характер – наблюдается минимум напряжений в случае, когда центр поперечного сечения сервисного тоннеля расположен на той же прямой, что и центры основных тоннелей. Максимальные растягивающие напряжения в обделках основных тоннелей также имеют минимум при $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 36000$ МПа (линии 1) и $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 37500$ МПа (линии 2), величина этих напряжений при $E_{2,1} = E_{2,2} = E_{2,3} = 39000$ МПа (линии 3) практически постоянна при изменении глубины заложения сервисного тоннеля.

С уменьшением глубины заложения сервисного тоннеля наблюдается снижение как максимальных растягивающих, так и максимальных сжимающих напряжений для всех рассматриваемых модулей деформации бетонных обделок – кривые 1, 2, 3 на рис. 5, б.

На рис. 6 *а, б* даны зависимости максимальных напряжений σ_θ, МПа в точках внутренних контуров поперечных сечений бетонных обделок (а – основных; б - сервисного тоннелей) от коэффициента бокового давления в ненарушенном массиве грунта λ при $E_0 = 20$ МПа, глубине заложения основных тоннелей $H = 20$ м, расстоянии между их осями 34 м, толщине зон укрепленного грунта вокруг тоннелей $\Delta = 1$ м и модуле деформации укрепленного грунта $E_0 = 1000$ МПа для трех положений сервисного тоннеля относительно основных: выше основных на 5 м (кривые *1*), на одной глубине с ос-

новными (кривые *2*), ниже основных на 5 м (кривые *3*).

Из рис. 6 следует, что зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ от λ имеют практически линейный характер. Положение сервисного тоннеля не сказывается на максимальных значениях напряжений, возникающих в обделках основных тоннелей. Напряжения в обделке сервисного тоннеля существенно зависят от его расположения относительно основных тоннелей и земной поверхности. Как следует из рис. 6, с увеличением λ как сжимающие, так и растягивающие напряжения во всех тоннелях уменьшаются. Растягивающие напряжения в обделках основных тоннелей исчезают при $\lambda > 0.95$, а в обделке сервисного тоннеля - при $\lambda > 0.8$ для всех рассмотренных глубин заложения тоннелей.

Получены также зависимости напряженного состояния обделок тоннелей от основных влияющих факторов при действии других нагрузок - давлении грунтовых вод, внутреннего давления воды, нагрузок, моделирующих вес зданий, сооружений или транспортных средств на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М. – Наука. – 1966. – 707 с.
2. *Араманович И.Г.* О распределении напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием// Докл. АН СССР. – М. – 1955. - Т. 104. - № 3. – С. 372 – 375.
3. *Фотиева Н.Н.* Аналитические методы расчета обделок тоннелей мелкого заложения// Подземное строительство России на рубеже XXI века. Труды Юбилейной научно-практической конференции, Москва, 15–16 марта 2000 г. – М. – 2000. – С. 123 – 132.
4. *Анциферов С.В.* Метод расчета многослойных обделок комплекса параллельных круговых тоннелей мелкого заложения// Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века: Опыт и перспективы. Труды Международной научно-практической конференции. Россия, Москва, 28 – 31 октября 2002 г. – Москва: ТИМР, 2002. – 367 – 370 с.
5. *Анциферов С.В., Анциферова Ю.С., Афанасова О.В., Капунова Н.А.* Программное обеспечение метода расчета обделок параллельных взаимовлияющих тоннелей мелкого заложения, сооружаемых с применением инъекционного укрепления грунта// Известия ТулГУ. Серия Геомеханика. Механика подземных сооружений. Выпуск 4. – ТулГУ. – Тула. – 2006. – С.248 – 256. ГИАБ

Коротко об авторе

Анциферов С.В. – ТулГУ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 18 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *Б.А. Картозия.*