УДК 622.831

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, М.А.КАРАСЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
Е.Г.КОЗИН
Петербургский метрополитен

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА НАГРУЗОК НА ОБДЕЛКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТОННЕЛЕЙ

Приведены закономерности натурных инструментальных наблюдений за вертикальными смещениями перегонных тоннелей по трассе Петербургского метрополитена. Выполнены новые пространственные постановки и решения контактных геомеханических задач о взаимодействии обделок с грунтовым массивом в условиях геостатического давления и при переменных вертикальных подъемах и опусканиях участков тоннелей. Проведено сопоставление расчетных растягивающих тангенциальных напряжений в обделках и закономерностей формирования зон трещинообразования в них.

Results of in-situ measurements on vertical displacements of tunnel lining of Saint-Petersburg subway are shown. The 3d soil-lining tunnel interaction model subjected to initial geostatic stress condition is considered and vertical displacements of a lining along the tunnel are applied as additional boundary condition. Comparison of calculated tangential tensional stresses in the lining with in-situ results of cracks zone formation is done.

Службой тоннельных сооружений Петербургского метрополитена с использованием высокоточных современных нивелиров выполняются периодические наблюдения за вертикальными смещениями по трассе перегонных тоннелей. В качестве деформационных марок используются путейские репера, расположенные в уровне путевого бетона и жестко связанные с несущей конструкцией обделки.

На рис.1 представлены графики натурных перемещений путейских реперов на участке между станциями «Обухово» и «Рыбацкое» за 18 лет эксплуатации. Наблюдаются закономерности и изменения вертикальных перемещений тоннеля.

Из анализа экспериментальных данных следует, что вдоль трасс перегонные тоннели испытывают вертикальные подъемы и опускания, которые могут изменяться по годам.

Значительные осадки перегонных тоннелей выявлены при пересечении погребенных долин, узлов тектонических разломов грунтового массива и других участков де-

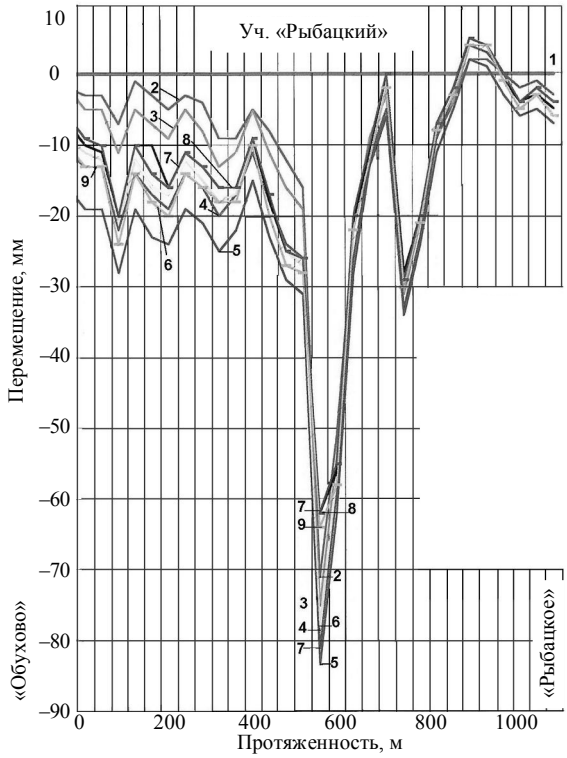


Рис.1. Изменение перемещений перегонных тоннелей на участке между станциями «Обухово» – «Рыбацкое»
1 – 1985; 2 – 1988; 3 – 1994; 4 – 1996; 5 – 1998; 6 – 2000; 7 – 2001 (после ремонта); 8 – 2002; 9 – 2003

зинтегрированной толщи пород. Резкий рост осадок также вызван некачественным выполнением горно-проходческих работ и возведением обделки.

В табл.1 приведены результаты натурных наблюдений за состоянием и характером деформирования обделки на участке «Обухово» – «Рыбацкое». Анализ состояния участка обделки тоннеля показывает, что в поперечных ребрах тюбингов и, в меньшей степени, в продольных возникают трещины отрыва.

Вследствие фильтрации воды через стыки (швы) сборной обделки происходит расслоение материала чугунных тюбингов.

Таблица 1

Результаты натурных наблюдений за состоянием обделки на участке «Обухово» – «Рыбацкое»

<table>
<tr><td rowspan="2">Результаты натурных наблюдений</td><td colspan="7">Участок тоннеля, отсчитываемый от начала координат, м</td></tr>
<tr><td>>100</td><td>100-300</td><td>300-400</td><td>400-500</td><td>500-600</td><td>600-700</td><td>700-1000</td></tr>
<tr><td>Количество трещин</td><td rowspan="3">Данные отсутствуют</td><td>14</td><td>3</td><td>7</td><td colspan="2">Данные отсутствуют</td><td rowspan="2">Данные отсутствуют</td></tr>
<tr><td>Места расположения трещин</td><td>Поперечные и продольные ребра жесткости тюбинга</td><td>Поперечные и продольные ребра жесткости тюбинга</td><td>Поперечные и продольные ребра жесткости тюбинга</td><td colspan="2">Трещины в подошве, параллельные оси тоннеля</td></tr>
<tr><td>Состояние обделки</td><td>Интенсивное расслоение чугуна</td><td>Фильтрация вод через обделку</td><td>Фильтрация вод через обделку</td><td>Фильтрация вод через чугун</td><td>Расслоение обделки</td><td>Отмечены признаки разрушения бетона и появление натечных форм после ремонта обделки в 2001 г.</td></tr>
</table>

Особенности разрушения чугунных тюбингов проявляются в их расслоении и последующей дезинтеграции. В процессе коррозии чугун становится рыхлым, губчатым, так как феррит переходит в раствор, выносится и вместо первоначального материала остается графитовый чешуйчатый скелет, который внутри заполнен продуктами коррозии. Продукты коррозии в свою очередь цементируют графит, благодаря чему конструкция сохраняет остаточную прочность и может функционировать в течение определенного времени, пока не начнется вторичный процесс разрушения новообразований. Вынос железа приводит к повышению фильтрующей способности обделки, в зависимости от ее проницаемости в тоннелях фиксируется либо постоянное увлажнение тюбингов, либо сосредоточенная фильтрация.

В работе рассматривается новая постановка задачи прогноза напряженно-деформированного состояния обделки и грунтового массива при переменных по трассе вертикальных подъемах и опусканиях тоннеля.

Для оценки напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей метрополитена при действии вертикальных подъемов и опусканий грунтового массива разработана пространственная конечно-элементная модель (рис.2). Геометрические размеры модели составляют по 40 м в кровле, почве и боку тоннеля от его оси. Длина модели составляет 1200 м.

Расчетная модель состоит из трех типов конечных элементов. Обделка и близлежащий массив представлены восьмиузловыми объемными элементами с несовместной формулировкой конечного элемента, массив в отдалении представлен клинообразными элементами с упрощенной формулировкой конечного элемента, а верхние два ряда элементов восьмью узловыми объемными элементами с упрощенной форму-

лировкой конечного элемента. Применение несовместных элементов обосновано тем, что они очень хорошо работают в искаженных элементах и дают возможность учитывать изменения напряжений по длине и ширине элемента, а также изгибающие моменты.

Вследствие геометрической и силовой симметрии рассматривается только половина тоннеля. Вертикальные грани параллелепипеда, моделирующего грунтовый массив вокруг тоннеля, закреплены в горизонтальных направлениях. К нижней грани параллелепипеда приложены вертикальные перемещения, полученные на основе натурных данных (рис.2). Для обеспечения неподвижности модели в вертикальном направлении два верхних торцовых ребра, параллельные оси 01, закреплены.

Целью исследования являлось определение только дополнительных компонент напряжений и перемещений, вызванных опусканием или подъемом грунтового массива по трассе тоннеля. Геостатическая составляющая напряжений и перемещений, вызванная весом грунта и обделки, определяется на основании вышеприведенных работ.

Обделка (рис.2) представляет собой вытянутый полуцилиндр, жестко связанный с грунтовым массивом, т.е. без возможности проскальзывания относительно массива. Механические свойства обделки задаются двумя параметрами: модулем упругости (деформации) и коэффициентом Пуассона (табл.2). Изменение свойств грунта по глубине не учитывалось из-за незначительности влияния на конечный результат.

Таблица 2

Деформационные характеристики крепи и грунтового массива

Деформационные характеристики	Наименование крепи и грунтов		
	Бетон	Чугун	Глины
Модуль упругости (деформации), МПа	$2{,}1 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$1{,}2 \cdot 10^2$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,28	0,28

Натурные смещения тоннеля (рис.3) использованы в качестве граничных усло-

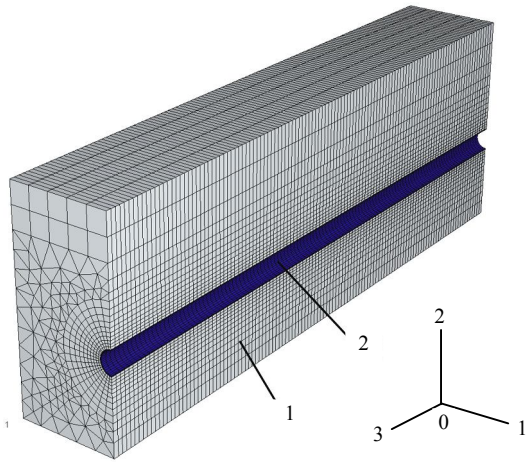


Рис.2. Обобщенное представление пространственной конечно-элементной модели перегонного тоннеля метрополитена

1 – грунтовый массив; 2 – обделка тоннеля

вий на нижней грани параллелепипеда. На горизонтальной оси отложены расстояния по трассе тоннеля в метрах, а на вертикальной – смещения 2003 г. по отношению к 1995 г. Точкам на графике соответствуют натурные данные смещений, а сплошная линия является их аппроксимацией.

В работе выполнен расчет напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей участка «Обухово» – «Рыбацкое». Длина участка моделирования составляла 1200 м. В работе приведены некоторые результаты расчета продольных напряжений σ_{zz} в обделке, тангенциальных напряжений σ_θ на внутреннем контуре и радиальных напряжений (радиальных нагрузок) σ_r на внешнем ее контуре.

Результаты расчета напряжений σ_{zz} в своде обделки тоннеля приведены на рис.4. Растягивающие напряжения приняты положительными, а сжимающие – отрицательными.

Из анализа расчетных данных следует, что на участке опускания тоннеля на расстоянии от 600 до 700 м в своде обделки тоннеля возникают растягивающие напряжения. Наибольшая величина растягивающих напряжений в своде обделки достигает 4,5 МПа.

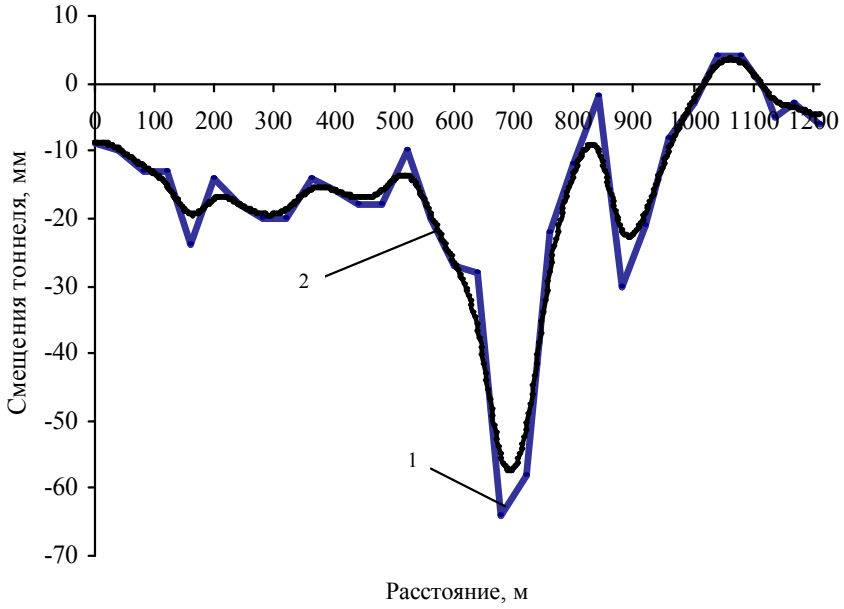


Рис.3. Вертикальные смещения тоннеля на участке «Обухово» – «Рыбацкое» согласно исходным данным (1) и полученные расчетным путем по низу тоннеля (2)

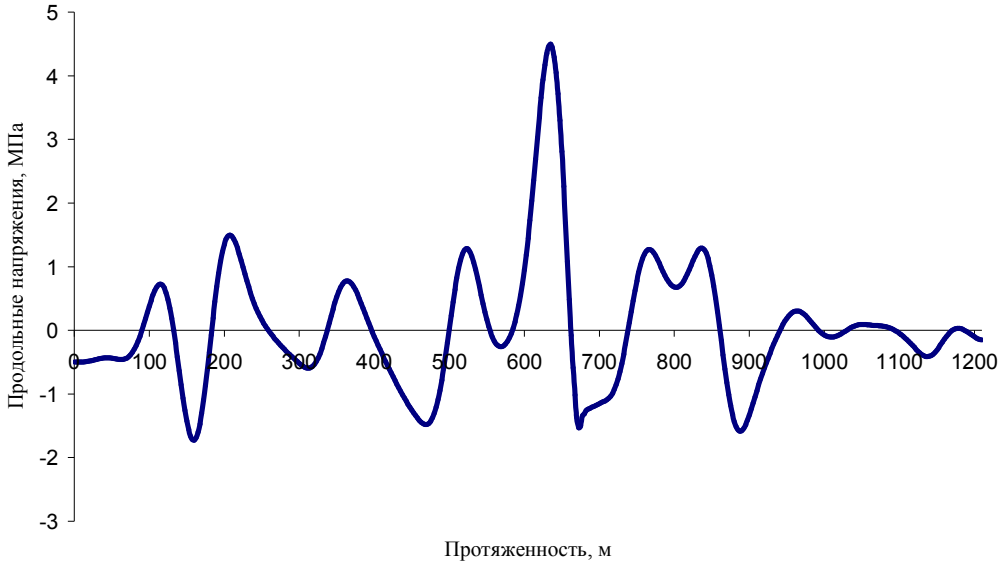


Рис.4. Продольные напряжения в своде обделки тоннеля

Возникновение значительных величин этих напряжений связано также с изменением материала обделки в точке с координатой 677 м. С левой стороны от точки 677 м на участке перегона «Обухово» – «Рыбацкое» тоннель закреплен чугунной тюбинговой крепью, а с правой стороны – комбинированная обделка из чугунной и тюбинговой крепи с нанесенной на нее рубашкой из монолитного железобетона.

Чугунная обделка имеет модуль упругости, больший по сравнению с модулем бетона в 3,8 раза. Величина напряжений σ_{zz} в своде чугунной обделки больше в 3,2 раза по сравнению с их величиной в железобетонной обделке.

Локальные максимумы растягивающих напряжений в своде обделки тоннеля выявлены в точках, расположенных на расстояниях 120, 200, 360, 520, 770 и 840 м. Эти локальные максимумы возникают под воздействием экстремумов вертикального перемещения обделки тоннеля, за исключением точки, расположенной на расстоянии 770 м.

Закономерности изменения тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки в своде в качественном отношении соответствуют закономерностям напряжений σ_{zz} (рис.4), но имеют другие величины по трассе (рис.5).

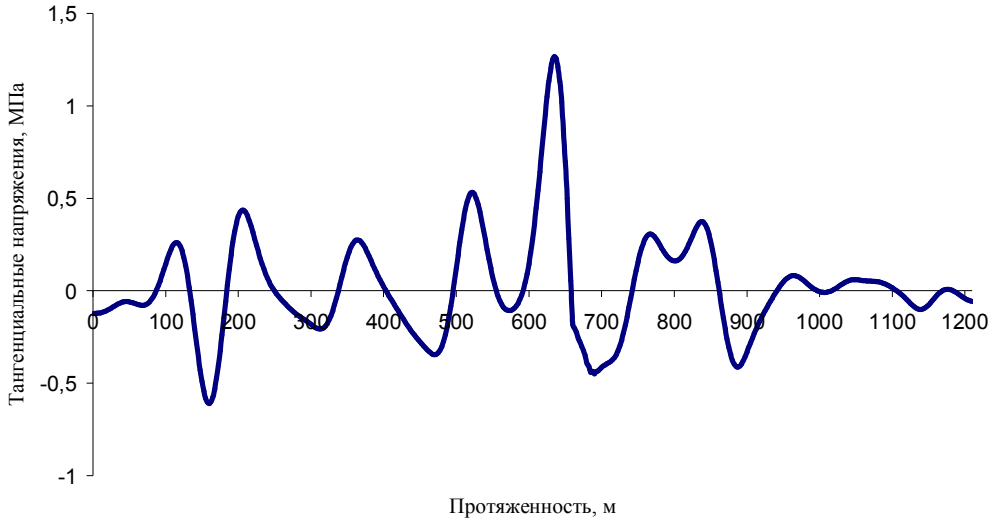


Рис.5. Тангенциальное напряжение в своде тоннеля на внутреннем контуре обделки (участок «Обухово» – «Рыбацкое», I путь)

Из анализа расчетных данных напряжений σ_θ следует, что на участке опускания тоннеля на расстоянии от 600 до 650 м в своде и лотковой части обделки возникают растягивающие напряжения, максимальная величина которых составляет 1,25 МПа. В боках обделки на этом участке имеет место резкая смена знаков напряжений σ_θ и переход от сжимающих напряжений к растягивающим. На скачкообразное изменение знака и увеличение концентрации напряжений σ_θ в обделке с левой стороны от точки с координатой 677 м оказывает влияние смена материала обделки в ней. В остальной части обделки тоннеля также чередуются участки формирования растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений.

В своде обделки тоннеля максимумы тангенциальных напряжений формируются в точках максимума продольных напряжений, все напряжения растягивающие. Точки максимума растягивающих напряжений, находящиеся на расстоянии 200; 360; 520 и 840 м, совпадают с точками максимумов подъемов обделки. Все точки минимума тангенциальных напряжений имеют место в точках минимума вертикальных осадок обделки на трассе тоннеля.

Эпюра распределения тангенциальных напряжений в лотковой части тоннеля практически совпадает с их распределением в своде обделки тоннеля.

Необходимо отметить, что нормативный предел прочности бетона класса В30, используемого в подземном строительстве, на одноосное растяжение при расчете по первому предельному состоянию равен 1,2 МПа. Анализ величин продольных и тангенциальных напряжений показывает, что в некоторых элементах обделки они превосходят предел прочности бетона на растяжение и поэтому возможно образование трещин отрыва.

Распределение радиальных напряжений в лотковой части внешнего контура обделки тоннеля приведено на рис.6. Из анализа эпюры радиальных напряжений (радиальных нагрузок) на обделку следует, что они носят волновой характер и по трассе тоннеля имеют различные знаки. Эпюры радиальных напряжений в своде и лотковой части обделки имеют в качественном и количественном отношениях одинаковые закономерности изменения, за исключением небольших отклонений величин напряжений в трех точках.

Точки локальных максимумов растягивающих напряжений соответствуют точкам локальных минимумов осадок обделки по трассе тоннеля, полученным по данным нивелирования.

На скачкообразное изменение радиальных напряжений (нагрузок) в точке с координатой 677 м оказывает влияние переход обделки с чугунной на комбинированную.

Локальные максимумы сжимающих радиальных напряжений формируются в точках подъема обделки по трассе тоннеля, полученным по данным нивелирования.

Необходимо отметить, что величина радиальной нагрузки на обделки тоннелей, вызванная подъемами и опусканиями грунтового массива, может быть большей.

Результаты расчета радиальных напряжений обделки в лотковой части по ее внешнему контуру на перегоне «Гражданский проспект» – «Девяткино» приведены на рис.7.

Из анализа расчетных данных следует, что по трассе тоннеля радиальные напряжения имеют выраженный знакопеременный волновой характер, наибольшая величина сжимающих напряжений составляет 48 кПа, растягивающих – 93 кПа.

В зоне незначительных подъемов и опусканий обделки тоннеля (0-400 м) величины радиальных напряжений в своде, боках и лотковой части обделки также незначительны, не более 0,01 МПа в абсолютном выражении.

Эпюры распределения радиальных напряжений в своде и боках обделки по трассе тоннеля одинаковы в качественном и количественном отношениях, за исключением небольших различий величин напряжений в точках экстремума.

Следует отметить, что характер кривых радиальных напряжений в своде и боках внутреннего контура обделки повторяет эпюры распределения тангенциальных напряжений в своде и лотковой части внешнего контура крепи и точки экстремумов практически совпадают.

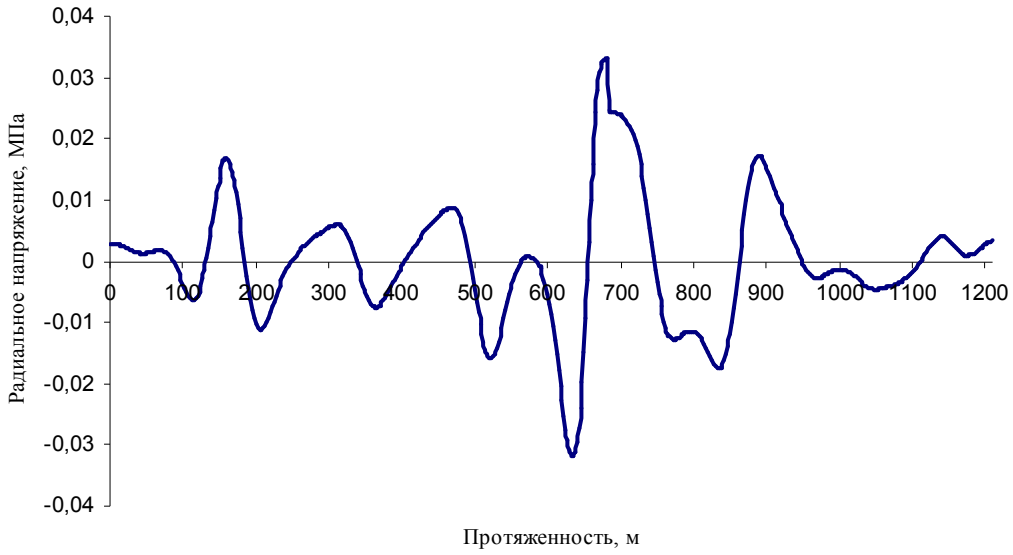


Рис.6. Радиальное напряжение в лотковой части тоннеля на внешнем контуре обделки на участке «Обухово» – «Рыбацкое»

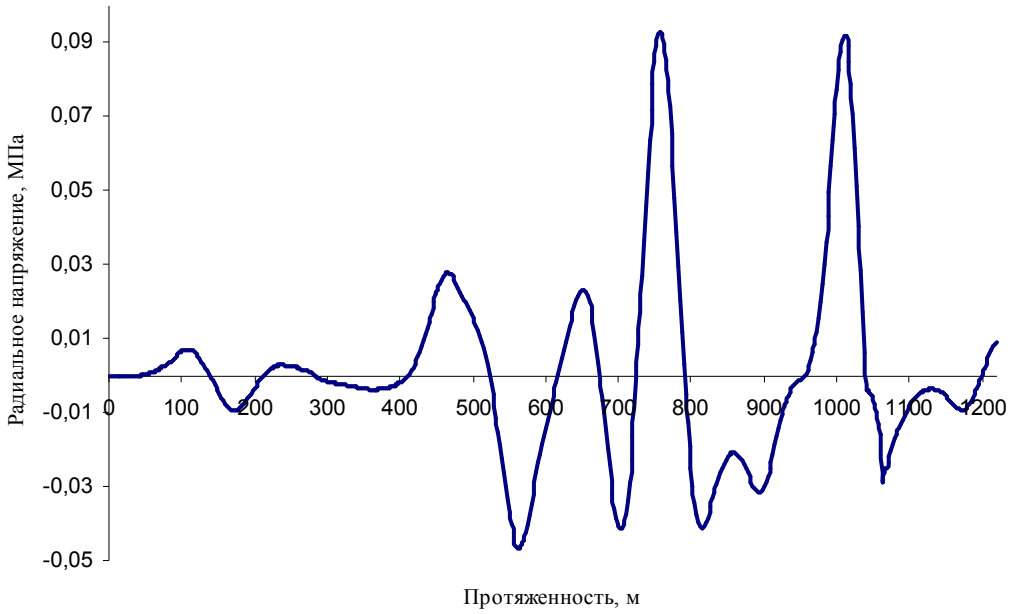


Рис.7. Радиальное напряжение в лотковой части тоннеля на внешнем контуре обделки на участке «Гражданский проспект» – «Девяткино»

Распределение радиальных напряжений в лотковой части внешнего контура обделки повторяет эпюры распределения тангенциальных напряжений в боках внешнего контура крепи и точки экстремумов практически совпадают.

Разработана пространственная конечно-элементная модель прогноза напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей из железобетонных тюбингов в условиях действия геостатического давления.

Методом расчета напряженно-деформированного состояния крепей капитальных выработок посвящено много работ, обзор которых можно найти в монографиях [1-3]. Практически все работы основываются на решении плоских задач, в которых крепь моделируется кольцом или кривым брусом.

При расчете нагрузок на тюбинговую крепь и ее параметров использовались приближенные методы [1-3]. В расчетах тюбинговая крепь заменялась системой колец или использовались методы строительной механики.

Реальное распределение нагрузок на крепь и напряжений в тюбинговой обделке может быть получено с помощью численных методов с их реализаций на современных компьютерах. Для определения напряженно-деформированного состояния обделки перегонного тоннеля в пространственной постановке рассмотрим взаимодействие железобетонного тюбингового кольца крепи шириной 1 м с грунтовым массивом. Кольцо состоит из железобетонных тюбингов с толщиной спинки 10 см и высотой ребра 25 см. Модуль упругости железобетонной крепи $E_1 = 3 \cdot 10^4$ МПа, а коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0{,}2$. Для исследования взаимодействия системы обделка – грунтовый массив выполнены расчеты для семи различных значений модуля деформации грунтового массива $E = 10; 50; 100; 200; 400; 800; 1600$ МПа и коэффициенте Пуассона $\nu = 0{,}3$.

Геомеханическая задача расчета сводится к определению напряжений и перемещений весомого параллелепипеда высотой 100 м, шириной 100 м и толщиной 1 м, боковые грани которого закреплены. Верхняя горизонтальная грань параллелепипеда свободна от внешних нагрузок и моделирует земную поверхность, а нижняя горизонтальная грань закреплена в вертикальном направлении.

В параллелепипеде имеется цилиндрическая полость кругового очертания с железобетонной обделкой, параллельная короткой стороне, моделирующая перегонный тоннель. Тоннель расположен на глубине 60 м от земной поверхности.

На рис.8 приведены результаты расчета тангенциальных напряжений в спинке внешнего контура обделки, а на рис.9 в поперечных ребрах внутреннего контура обделки относительно оси тоннеля.

Положительные напряжения в обделке считаются растягивающими, а отрицательные – сжимающими.

Из анализа тангенциальных напряжений в спинке тюбинговой крепи следует, что в своде обделки и боку при $E_1 > 50$ МПа напряжения сжимающие. Растягивающие напряжения в боку спинки обделки появляются только для нарушенного дезинтегрированного грунтового массива. С увеличением модуля деформации глины величина тангенциальных сжимающих напряжений снижается в боку до 15 МПа и в своде до 7,5 МПа, что меньше предела прочности бетона класса В30 на одноосное сжатие 19 МПа.

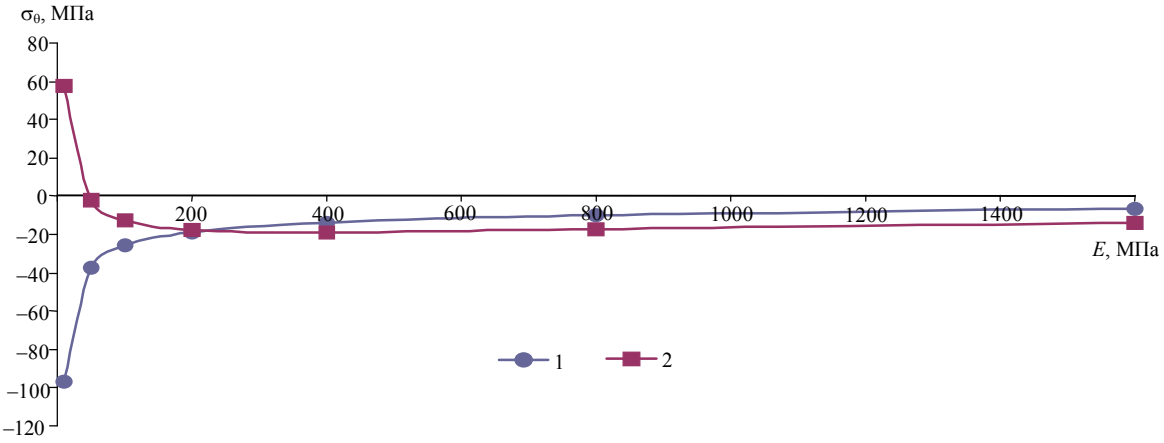


Рис.8. Закономерности распределения тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки в зависимости от модуля деформации грунтового массив в своде (1) и в боку (2) тоннеля

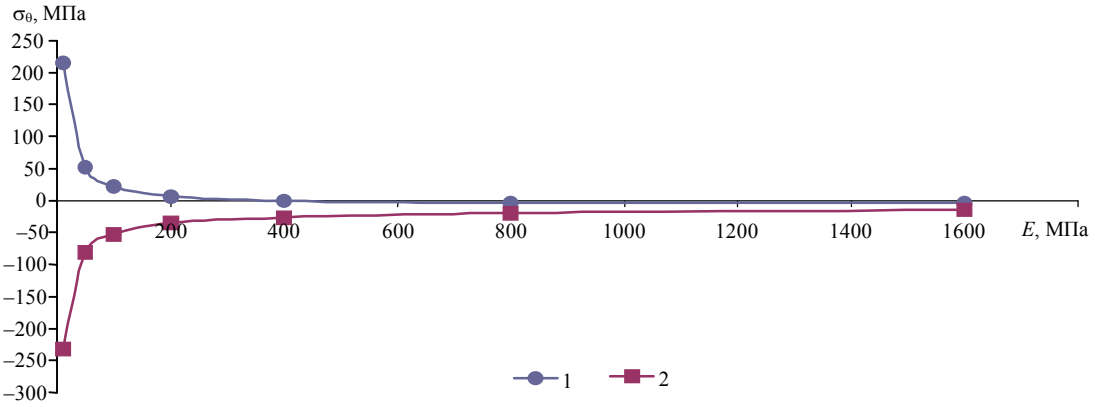


Рис.9. Закономерности распределения тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки в зависимости от модуля деформации грунтового массива в своде (1) и в боку (2) тоннеля

Из анализа тангенциальных напряжений в ребрах внутреннего контура следует, что в своде обделки напряжения растягивающие, а в боку сжимающие. При небольших значениях модуля деформации глины в ребрах свода обделки возникают значительные растягивающие напряжения, которые при $E = 100$ МПа и $E = 200$ МПа соответственно равны 21,9 и 5,99 МПа.

Данные величины напряжений значительно превосходят предел прочности бетона класса В30 на одноосное растяжение и в поперечных ребрах будут появляться трещины отрыва. Необходимо отметить, что тангенциальные растягивающие напряжения значительной величины формируются также в продольных ребрах железобетонных тюбингов. С увеличением модуля деформации грунтового массива величина тангенциальных сжимающих напряжений в ребрах свода обделки стремится к нулю, а в ребрах бока обделки к 12,5 МПа.

Приведенные закономерности распределения σ_θ в обделке перегонного тоннеля являются новыми и позволяют получить реальную оценку прочности конструкций. В ребрах свода тюбинговой железобетонной обделки перегонных тоннелей на нарушенных дезинтегрированных участках трассы грунтового массива под действием тангенциальных растягивающих напряжений формируются трещины отрыва. Участки расположения наибольших растягивающих тангенциальных напряжений соответствуют зонам трещинообразования, наблюдаемым в натуральных условиях (см. табл.1, рис.10).

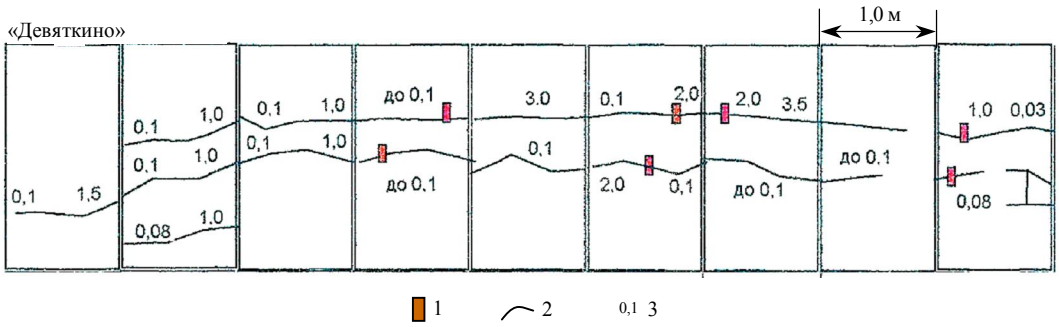


Рис.10. Закономерности распределения трещин в тюбинговой обделке на дезинтегрированном участке перегонного тоннеля между станциями «Девяткино» – «Гражданский проспект»

1 – установленный «маяк»; 2 – трещина; 3 – ширина раскрытия трещины, мм

Необходимо отметить, что при моделировании тюбинговой крепи системой многослойных колец из решения контактной задачи взаимодействия обделка – грунтовый массив следует, что в своде обделки растягивающие напряжения отсутствуют.

Приведенные методы расчета напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей с тюбинговой обделкой необходимо использовать при проектировании их параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баклашов И.В.* Механика подземных сооружений и конструкции крепи / И.В.Баклашов, Б.А.Картозия. М.: Недра, 1984.

2. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982.

3. *Булычев Н.С.* Расчет крепи капитальных горных выработок / Н.С.Булычев, Б.З.Амусин, А.Г.Оловянный. М.: Недра, 1979.