

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328-82 25*
В.Л.ТРУШКО, *д-р техн. наук, профессор, trushco@spmi.ru*
М.А.КАРАСЕВ, *канд. техн. наук, доцент, karasevma@gmail.com*
Д.В.СИДОРОВ, *канд. техн. наук, зав. лабораторией, sidorov-post@yandex.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-82-25*
V.L.TRUSHKO, *Dr. in eng. sc., professor, trushco@spmi.ru*
M.A.KARASEV, *PhD in eng. sc., associate professor, karasevma@gmail.com*
D.V.SIDOROV, *PhD in eng. sc., head of the chair, sidorov-post@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ОЦЕНКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЮБИНГОВЫХ ОБДЕЛОК ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ

Выполнено сопоставление результатов расчетов тангенциальных напряжений на внутреннем контуре тубинговой обделки и радиальных напряжений на внешнем контуре, найденных на основе решения задачи взаимодействия «обделка – грунтовый массив» в пространственной и плоской (однослойное и двухслойное кольцо) постановках. Выявлена область корректного применения плоских моделей.

Ключевые слова: обделка, тубинг, напряжение, задача, постановка, плоская деформация, кольцо, взаимодействие.

DESIGN OF TUNNEL LINING OF MAIN LINE TUNNELS BASED ON THE EVALUATION OF STRESS DISTRIBUTION PATTERNS IN TUNNEL LINING

Comparison of results of calculations of the tangential stresses on the inner contour of tunnel lining and radial stresses on the outer contour is done. Stresses are found by solving the problem of interaction in geomechanical system «lining-ground massif» in 2D and 3D model (single layer tunnel lining and double layer tunnel lining). Area of correct application of 2D models are revealed.

Key words: tunnel lining, tubing, stress, problem, statement, plain strain, tube, interaction.

В методике Н.С.Булычева и А.Г.Оловянного [1] обделка тоннеля моделируется двухслойным кольцом. Внешнее кольцо составляют спинки тубингов, внутренним слоем являются ребра и пространство между ними. Деформационные характеристики внутреннего слоя обделки принимаются как средневзвешенные для слоя.

В работах [2-4] приведены решения задачи о напряженном состоянии тубинговой обделки в пространственной постановке.

Из анализа взаимодействия тубинговой обделки с грунтовым массивом следует, что условия плоской деформации имеют ме-

сто только для сечения, перпендикулярного к оси тоннеля и проходящего через середины спинок. Для всех других сечений задача взаимодействия тубинговой обделки с массивом является пространственной.

В настоящее время при проектировании параметры обделок обычно рассчитываются в плоской постановке. Поэтому большой практический интерес представляет оценка напряженного состояния тубинговой обделки в плоской и пространственной постановках.

Для сравнения параметров напряженного состояния, полученных в плоской и

объемной постановке, рассмотрим модель плоского сечения, проходящего через середины спинок тубингового кольца перпендикулярно к оси тоннеля с учетом взаимодействия обделки и грунтового массива. Глубина заложения, геометрические размеры тоннеля и обделки, деформационные характеристики грунта и конструкции, влияние забоя приняты одинаковыми для плоской и пространственной задач.

Сравним результаты расчетов напряженно-деформированного состояния обделки только для ее характерных участков.

Несущая способность обделки тоннелей обычно определяется по размеру тангенциальных напряжений на внутреннем контуре. Поэтому вначале рассмотрим эпюры распределения тангенциальных напряжений σ_θ по внутреннему контуру по средней линии спинки тубингового кольца, полученные при расчетах в плоской (однослойное кольцо, задача Ламе) и пространственной постановках и по методике Н.С.Булычева и А.Г.Оловянного (двухслойное кольцо) [1]. Анализ сопоставительных расчетов показывает, что все эпюры тангенциальных напряжений имеют форму эллипса, вытянутого в горизонтальном направлении. В расчетах в объемной постановке и при плоской деформации для однослойного кольца учитывается наличие ребер в сечении обделки, поэтому эпюры напряжений отражают скачкообразный характер изменения. При этом в боках тоннеля размер напряжений σ_θ для условий плоской деформации до 2 раз превышает соответствующие размеры напряжений для объемной задачи.

Тангенциальные напряжения σ_θ в боку тоннеля, найденные при плоской деформации для двухслойного кольца (рис.1, а), в 1,2-1,7 раза больше соответствующих напряжений σ_θ , полученных при решении объемной задачи.

Сопоставим результаты расчетов тангенциальных напряжений σ_θ на внутреннем контуре обделки по средней линии кольцевого ребра тубингового кольца (рис.1, б). Анализ размера и характера распределения напряжений показывает, что наибольшее раз-

личие между напряжениями имеет место в боку и шельге свода обделки для слабых грунтов. При этом расчеты напряжений в плоской постановке дают заниженные значения по сравнению с пространственной постановкой. Так, при $E = 50$ МПа напряжения σ_θ при плоской задаче с однослойным кольцом в боку занижены на 36 %, с двухслойным кольцом – на 57 %, а в шельге свода соответственно на 30 и на 52 %. С увеличением модуля общей деформации грунта значения напряжений в шельге свода, полученные по разным методикам, быстро сближаются. В боку обделки процесс сближения значений напряжений происходит весьма медленно.

Из сравнения результатов расчета напряжений в ребре (рис.1, б) следует, что в условиях плоской деформации значения напряжений в наиболее напряженных участках обделки (шельга свода и бок) занижены до 2 раз. Это может привести к некорректному выбору параметров обделки.

Распределение радиальных напряжений (нагрузок) по внешнему контуру обделки тоннеля приведено на рис.1, в. Анализ результатов расчетов показывает, что в плоской задаче значения радиальных напряжений больше, чем в пространственной постановке. Так, для слабых грунтов при $E = 100$ МПа значения радиальных нагрузок, найденные в условиях плоской деформации для однослойного и двухслойного кольца в боку обделки тоннеля, больше на 4-40 %, а в шельге свода соответственно на 37 % и 16 %. Такая закономерность наблюдается при всех значениях модуля общей деформации грунтов.

Анализируя представленные выше результаты, видим, что ни одна из плоских моделей не позволяет корректно оценить напряженное состояние обделки. На внутреннем контуре результаты напряжений в тубинговой обделке, которая представлена сплошным кольцом (задача Ламе), лучше соотносятся с результатами напряженного состояния, полученными для объемной модели, чем для двухслойной модели. Обратная картина наблюдается на внешнем контуре тубинговой обделки по ее ребру.

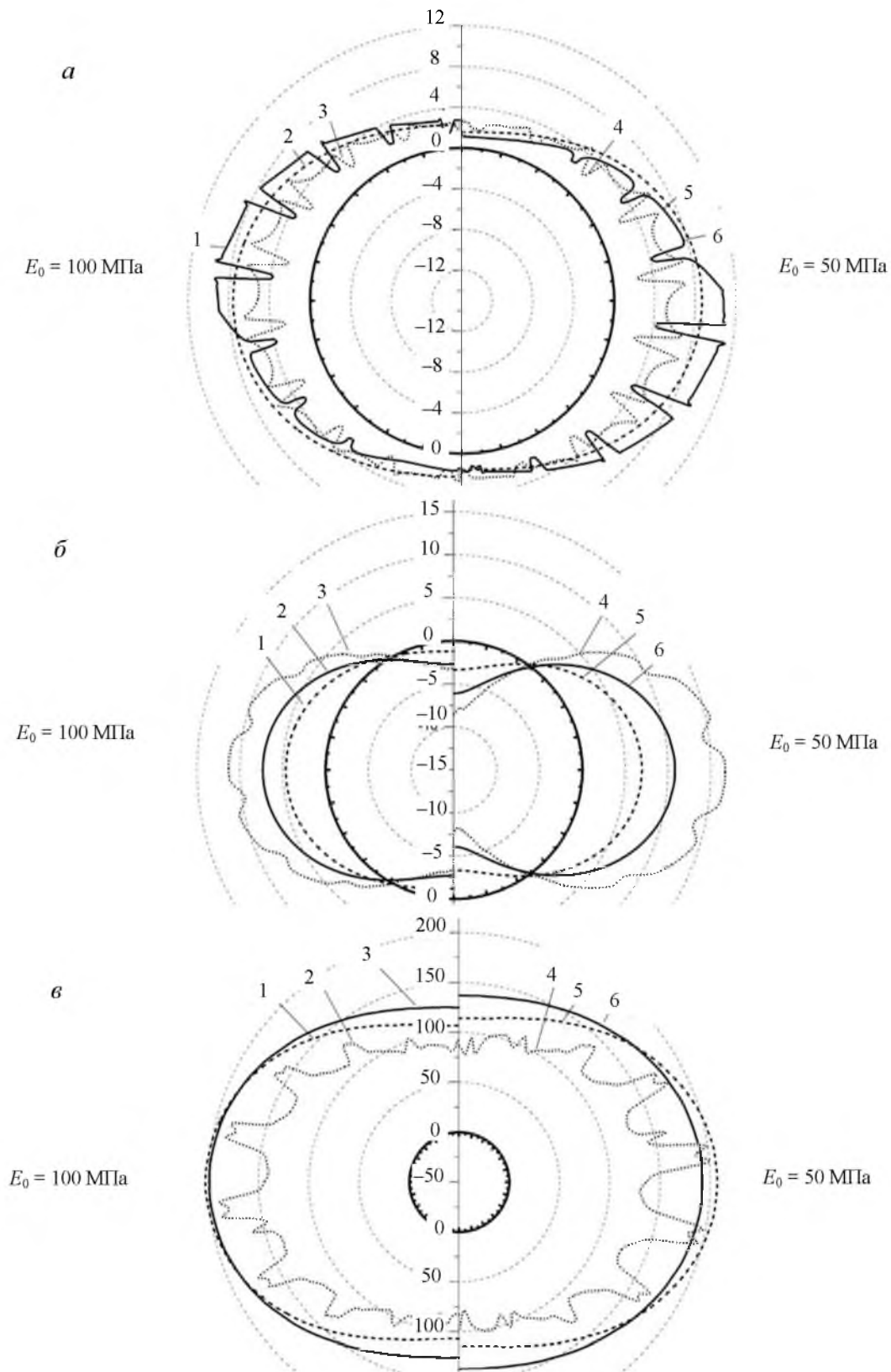


Рис.1. Эпюры распределения: тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки по середине спинки (а), тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки по середине ребра (б), радиальных напряжений на внешнем контуре ребра обделки (в). Коэффициент бокового давления $\lambda = 0,4$
 1, 6 – плоская деформация (однослойное кольцо); 2, 5 – плоская постановка (двухслойное кольцо); 3, 4 – объемная постановка



Рис.2. Зависимость изменения тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки от модуля деформации окружающего массива (ребро, $\lambda = 0,4$)

1-3 – в боках (1 – объемная постановка; 2 – плоская постановка, однослойное кольцо; 3 – плоская постановка, двухслойное кольцо); 4-6 – в своде (4 – плоская постановка, двухслойное кольцо; 5 – плоская постановка, однослойное кольцо; 6 – объемная постановка)

Рассмотрим подробнее, как соотносятся результаты напряженного состояния тубинговой обделки, полученные по объемной и плоским расчетным схемам, для других модулей деформации грунтового массива.

Сравнивая распределения тангенциальных напряжений на внутреннем контуре тубинговой обделки (рис.2), полученные по схеме однослойного кольца и объемной схеме, видим, что значения тангенциальных напряжений в своде, в диапазоне изменения модуля общей деформации грунта 250-1600 МПа, очень близки. Когда модуль общей деформации грунта равен 50-100 МПа, наблюдается отличие по значениям напряжений на 15-30%. В боках, где обе расчетные модели прогнозируют сжимающие напряжения во всем диапазоне свойств грунта, тангенциальные напряжения, полученные по объемной схеме, на 1-6 МПа больше, чем тангенциальные напряжения, полученные в плоской постановке.

Таким образом, с учетом того, что для оценки прочности тубингов наибольшую опасность представляют растягивающие напряжения, а значительные сжимающие напряжения формируются только при малых модулях общей деформации грунта, с точки зрения практического расчета рационально выделить грунты с модулем деформации 250 МПа и ниже.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта 16.515.11.5080 от 10 октября 2011 г. Программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». Наименование проекта «Разработка научно-технических основ геомеханически безопасного освоения пространства мегаполисов в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях».

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев Н.С. Расчет крепи капитальных горных выработок / Н.С.Булычев, Б.З.Амусин, А.Г.Оловянный. М.: Недра, 1974. 320 с.
2. Карасев М.А. Натурные обследования тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния тубинговой обделки // Инновации в геонауке и геоинженерии / Фрайбергская горная академия, Фрайберг. 2008. С.272-280.
3. Протосеня А.Г. Пространственное напряженно-деформированное состояние и оценка прочности тубинговой обделки тоннелей // Метро и тоннели (Тоннельная ассоциация России). 2008. № 4. С. 23-26.
4. Протосеня А.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния тубинговых крепей и обделок на основе пространственных моделей / А.Г.Протосеня, М.А.Карасев // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Тр. 5-й Межрегион. практ. конф. Воркута, 2007. С. 45-49.

REFERENCES

1. Bulichev N.S., Amusin B.Z., Olovany A.G. Structural lining design of underground structures. Moscow, 1974. 320 p.
2. Karasev M.A. Experimental observation and numerical simulation of tunnel lining located at different geological condition of Saint-Petersburg Metro // Innovations in Geoscience, geoengineering / Freiberg Technische Universität Bergakademie. Freiberg, 2008. P. 272-280.
3. Protosena A.G., Karasev M.A., Petrov D.N. Structural design of tunnel lining based on 3D numerical modeling // Subway and Tunnels (Tunneling association of Russia). 2008. N 4. P. 23-26.
4. Protosena A.G., Karasev M.A. Stress and strain state of tunnel tubing lining based on 3d numerical modeling. Development of mineral resource: problems and solutions: 5-th international practical conference. Vorkuta, 2007. P. 45-49.