

УДК 622.011.4:622.023

С. А. ЗВЕРЕВ, Н. М. МАХМЕТОВА, В. Г. СОЛОНЕНКО

*Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева,
Алматы, Республика Казахстан*

ТРЕХМЕРНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Работа представляет собой численное исследование, направленное на изучение напряженно-деформированного состояния как обделок эскалаторных тоннелей метрополитена, так и окружающего грунтового массива в целях обоснования сооружения обделок эскалаторных тоннелей из монолитного железобетона. Проведены многовариантные численные эксперименты по изучению напряженно-деформированного состояния конструкций обделки эскалаторных тоннелей на действие постоянных и сейсмических нагрузок. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по подбору площади и класса продольной и кольцевой арматуры. Разработанные рекомендации позволяют сделать вывод о целесообразности сооружения эскалаторного тоннеля с обделкой из монолитного железобетона в условиях г. Алматы.

Ключевые слова: эскалаторный тоннель, напряженно-деформированное состояние, конечноэлементное моделирование, сейсмические нагрузки.

В настоящее время эскалаторные тоннели изготавливают, как правило, из чугунных тубингов. В то же время известно, что стоимость одного кубометра сборного железобетона примерно в три раза меньше стоимости одной тонны чугунных тубингов. Можно предположить, что при использовании монолитного железобетона экономический эффект будет ещё больше. Поэтому имеется необходимость разработки практических рекомендаций по возможному конструктивно-технологическому решению обделок эскалаторных тоннелей из монолитного железобетона с учетом инженерно-геологических особенностей конкретной местности [1].

Современные методы расчета напряжений и соответствующие им программные комплексы позволяют эффективно оценить несущую способность обделки эскалаторного тоннеля и определить НДС окружающего грунтового массива в объемной постановке задачи. Использование метода конечных элементов (МКЭ) дает возможность в полной мере учитывать конструктивные особенности обделки в объемной постановке задачи и повысить точность получаемых результатов. При этом сравнительно легко решается задача изменения физико-механических характеристик грунтов, а также изменения граничных условий и нагрузок. Кроме того, МКЭ позволяет выполнять анализ НДС при основном и особом сочетаниях нагрузок.

Известны статьи по исследованию НДС эскалаторных тоннелей, связанные с анализом напряжений и деформаций на стадии строительства такого тоннеля [2–4]. В докладе [5] рассмотрены некоторые аспекты, связанные с сейсмическим нагружением системы станция метро – эскалатор – тоннель. Целью представленной работы является проведение расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) эскалаторных тоннелей при воздействии постоянных, сейсмических и при особом сочетании нагрузок для научного обоснования возведения обделок его из монолитного железобетона в условиях г. Алматы, что позволяет получить значительный экономический эффект по сравнению с обделкой из чугунных тубингов.

На основе метода конечных элементов в сочетании с прямым методом Гаусса и методом разложения перемещений по формам собственных колебаний изучено напряженно-деформированное состояние обделки эскалаторного тоннеля при различных сочетаниях нагрузок.

Исследование НДС обделки проводилось под действием постоянных нагрузок и сейсмического воздействия. При исследовании НДС обделки от постоянных нагрузок (статический расчет) для материала обделки эскалаторного тоннеля были приняты следующие физико-механические характеристики: приведенный модуль упругости бетона класса В30 принят $E_6 = 35200$ МПа, коэффициент Пуассона бетона $\nu_6 = 0,2$, плотность $\rho_6 = 2,585$ т/м³. Для тяжелого бетона класса В30 расчетное сопротивление сжатию для тяжелого бетона класса В30 – $R_b = 15,5$ МПа, расчетное сопротивление растяжению $R_{bt} = 1,1$ МПа [6, 7]. Расчёты на сейсмическое воздействие выполнено с использованием двухкомпонентной расчётной акселерограммы, действующей на глубине $h = 59,0$ м.

1 Расчет и анализ результатов трехмерного НДС обделки эскалаторного тоннеля при воздействии постоянных нагрузок – собственного веса конструкции и грунтового массива. Тангенциальные напряжения на внутренней поверхности обделки, соответствующие вычисленным деформациям, представлены на рисунке 1. Максимальные растягивающие напряжения наблюдаются в нижней зоне тоннеля, лотке и своде и достигают величины $\sigma_{max}^p = 19,4$ МПа. Наибольшие сжимающие напряжения возникают на уровне горизонтального диаметра и составляют $\sigma_{max}^{сж} = 25,3$ МПа.

Распределение нормальных продольных напряжений на внутренней поверхности обделки представлено на рисунке 2. Растягивающие напряжения достигают величины $\sigma_{max}^p = 10,2$ МПа и возникают в нижней лотковой зоне обделки. Максимальные сжимающие напряжения составляют $\sigma_{max}^{сж} = 22,8$ МПа и наблюдаются в ограниченной нижней зоне свода, длина которой составляет около 3,5 м.

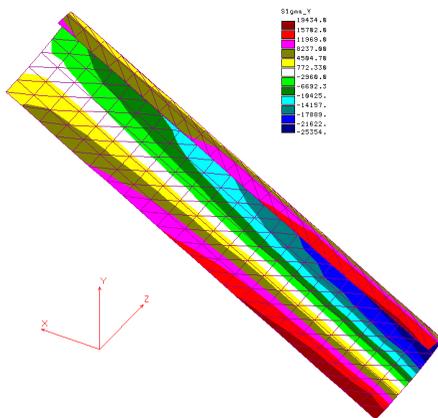


Рисунок 1 – Распределение тангенциальных напряжений на внутренней поверхности обделки (кПа)

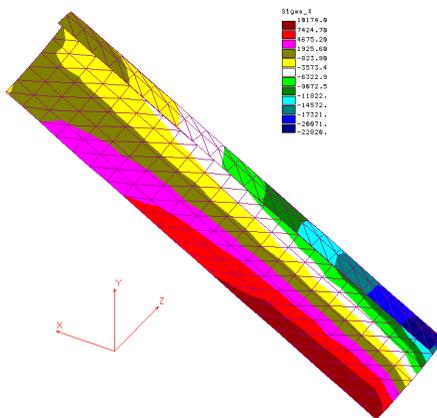


Рисунок 2 – Распределение продольных напряжений на внутренней поверхности обделки (кПа)

2 Расчет и анализ результатов трехмерного НДС обделки эскалаторного тоннеля при воздействии сейсмических нагрузок. Для анализа напряженно-деформированного состояния конструкции обделки тоннеля в целом при сейсмическом воздействии выбран момент времени $t^* = 5,19$ с, которому соответствуют экстремальные значения напряжений.

На рисунке 3 представлено распределение нормальных тангенциальных сейсмических напряжений во внутренней обделке тоннеля. На внутренней поверхности наибольшие растягивающие тангенциальные напряжения достигают величины $\sigma_{\max}^D = 2,68$ МПа в нижней зоне лотка тоннеля, наибольшие сжимающие напряжения составляют $\sigma_{\max}^{CЖ} = 4,43$ МПа и наблюдаются в опорной зоне в сечении, перпендикулярном к вертикальному направлению.

На рисунке 4 приведено распределение нормальных продольных сейсмических напряжений во внутренней обделке. На внешней поверхности максимальные растягивающие напряжения достигают значения $\sigma_{\max}^D = 0,58$ МПа и наблюдаются в ограниченной нижней зоне обделки. Наибольшие сжимающие напряжения составляют $\sigma_{\max}^{CЖ} = 1,3$ МПа и возникают в лотковой опорной зоне.

На внутренней поверхности наибольшие растягивающие напряжения достигают величины $\sigma_{\max}^D = 1,07$ МПа в ограниченной опорной зоне свода, наибольшие сжимающие напряжения $\sigma_{\max}^{CЖ} = 1,41$ МПа имеют место в опор-

ной зоне в перпендикулярном вертикальному направлению диаметрального сечении. В остальных зонах тоннеля продольные растягивающие напряжения на внутренней поверхности не превышают $\sigma^p = 0,6$ МПа.

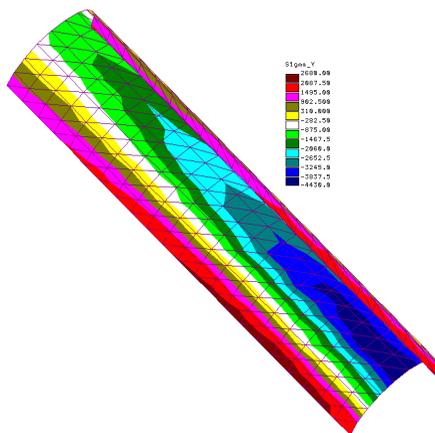


Рисунок 3 – Распределение тангенциальных напряжений на внутренней поверхности обделки (кПа) в момент времени $t^* = 5,19$ с

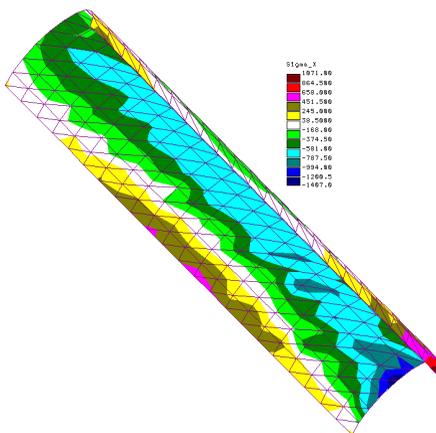


Рисунок 4 – Распределение продольных напряжений на внутренней поверхности обделки (кПа) в момент времени $t^* = 5,19$ с

Анализ полученных результатов позволил установить, что максимальные тангенциальные напряжения на внешней поверхности обделки зафиксированы в нижней зоне тоннеля на уровне горизонтального диаметра $\sigma_{\max}^p = 15,8$ МПа, а на внутренней поверхности в нижней зоне, лотке и своде $\sigma_{\max}^p = 19,4$ МПа. Сейсмические напряжения составляют не более 14–18 % от напряжений при постоянных нагрузках, причем соответствуют тем же зонам, а величины этих напряжений превышают расчетные значения для случая действия постоянных нагрузок, поэтому требуют выполнения тщательного армирования.

По результатам проведенных исследований даны рекомендации по подбору площади и класса продольной и кольцевой арматуры.

Таким образом, на основе изучения закономерностей распределения напряжений в обделке при постоянных и сейсмических нагрузках научно обоснована целесообразность возведения обделок эскалаторных тоннелей в условиях г. Алматы из монолитного железобетона с целью увеличения жесткости и снижения величин напряжений в кольцевых сечениях обделки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 The Pretunnel: A New Construction Technigue in Mechanized Tunnelling / S. Maccan [et al.] // North American Tunnelling'96 : Proceedings of the International Conference, Washington, DC, USA, 21–24 April 1996. – Rotterdam : Balkema, 1996. – Vol. 1. – P. 331–338.

2 **Безродный, К.П.** Строительство эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена / К. П. Безродный, М. О. Лебедев, Г. Д. Егоров // Метро и тоннели. 2015. – № 1. – С. 14–17.

3 **Ayaydin, N.** Metro Istanbul – Kadıköy, an Underground Station Close to the Sea and Below a Historical Building / N. Ayaydin, Z. Ekici, H. Walter // Geomechanics and Tunnelling. – 2008. – Vol. 1, No. 3. – P. 189–196.

4 **Novozhenin, S. U.** New Method of Surface Settlement Prediction for Saint-Petersburg Metro Escalator Tunnels Excavated by EPB TBM / S. U. Novozhenin, M. G. Vystrchil // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 2266–2271.

5 Calculation of the three dimensional seismic stressed state of “Metro Station–Escalator–Open Line Tunnels” system, which is located in inclined stratified soft ground / R. B. Vaimakhan [et al.] // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground : Proceedings of the 6th International Symposium (IS-Shanghai 2008). – Boca Raton : CRC Press, 2008. – P. 751–755.

6 **Махметова, Н. М.** Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния обделки типового участка станции / Н. М. Махметова // Вестник КГУСТА. – 2016. – № 3 (37). – С. 116–120.

7 Метод конечных элементов в задачах транспортного строительства / Н. М. Махметова [и др.]. – Алматы : КазАТК, 2013. – 438 с.

S. A. ZVEREV, N. M. MAKHMETOVA, V. G. SOLONENKO

Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan

THE THREE-DIMENSIONAL STRESS-STRAIN STATE OF ESCALATOR TUNNELS UNDER THE ACTION OF CONSTANT AND SEISMIC LOADS

The investigation is a numerical study aimed to study stress-strain state of both metro escalator tunnels lining and the surrounding ground mass for the purpose of substantiating the construction of escalator tunnels lining from monolithic reinforced concrete. There were performed the multivariate numerical experiments for stress-strain state analysis of the escalator tunnels lining constructions under the action of permanent and seismic loads. Based on the investigation results there were given the recommendations on the selection of the area and class of longitudinal and annular reinforcement. The formulated recommendations allow to make the conclusion that under the Almaty conditions it is expedient to build the escalator tunnel with the lining made of monolithic reinforced concrete.

Получено 13.02.2018