УДК 624.1

П.А.ДЕМЕНКОВ, *канд. техн. наук, доцент, dem-petr@yandex.ru*
И.Е.ДОЛГИЙ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328 86 25*
В.И.ОЧКУРОВ, *канд. техн. наук, доцент, (812) 328 86 25*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

P.A.DEMENKOV, *PhD in eng. sc., associate professor, dem-petr@yandex.ru*
I.E.DOLGIY, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328 86 25*
V.I.OCHKUROV, *PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328 86 25*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Рассмотрены проблемы, связанные с геомеханическим прогнозом напряженно-деформированного состояния станций глубокого заложения. Показан комплексный подход изучения статической работы станций, включающий натурные исследования на различных этапах их строительства и численное моделирование методом конечных элементов.

***Ключевые слова*:** станции метрополитена, нагрузки, натурные исследования, колонно-прогонные комплексы, метод конечных элементов, геомеханический прогноз.

GEOMECHANICAL PROBLEMS IN THE FORECAST OF STRESS-STRAIN STATE OF UNDERGROUND STATIONS OF THE METRO AT A GREAT DEPTH

Forecast of stress and strain state of deep underground metro stations is considered in this article. A complex approach to study of static work of the metro stations including the in situ testing at different stages of their construction and numerical modeling with finite element method is shown.

***Key words*:** the metro station, loads, in-situ testing, column-run complexes, finite elements method, geomechanical forecast.

Для разработки обоснованных аналитических методов расчета нагрузки на станции метрополитенов необходимо располагать в первую очередь экспериментальными методами на основе натурных исследований, позволяющими максимально приблизить расчетную схему к действительным условиям работы конструкций.

Методы измерения нагрузок на крепь горных выработок подразделяют на две основные группы: непосредственные и косвенные. К первой группе относят методы, с помощью которых измеряют непосредственно искомую величину, т.е. нагрузку. Измерительные приборы (динамометры, мессдозы, динамометрические площадки и т.д.), как правило, устанавливают на контакте с окружающим массивом, и нагрузка со стороны горных пород передается непосредственно на деформируемый элемент прибора.

Ко второй группе относят методы, с помощью которых измеряют величины, связанные с нагрузкой функциональной зависимостью. При косвенных методах непосредственно определяют деформации, напряжения или усилия в элементах крепи, которые в дальнейшем используют в качестве исходных данных при определении

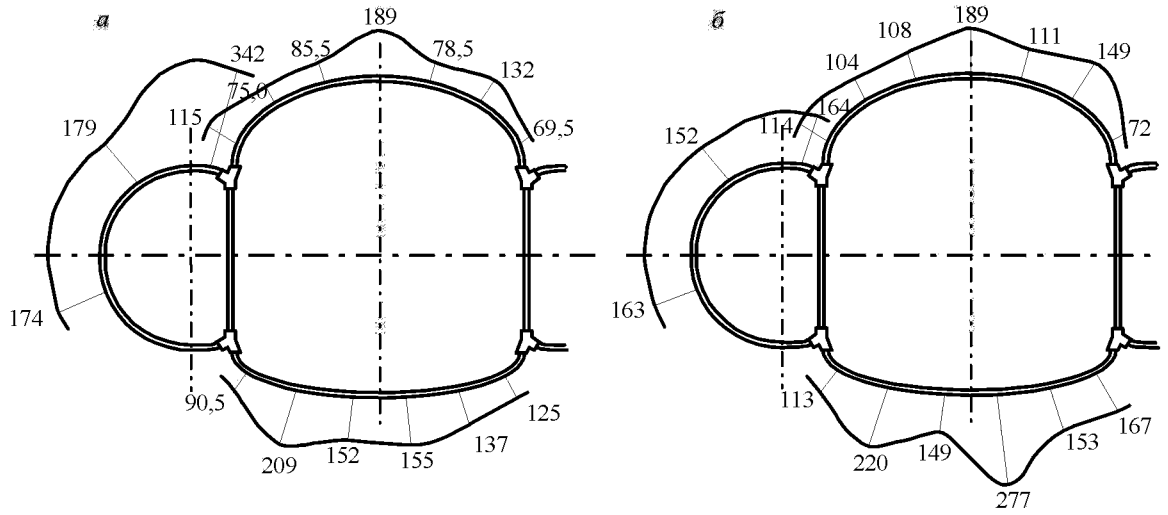


Рис.1. Эпюра средних контактных давлений на обделку станции «Парк Победы»: *а* – при наибольшем давлении на левый тоннель; *б* – при установившемся давлении

фактических нагрузок, вызвавших эти деформации. Измерение деформаций и напряжений в элементах крепи производят с помощью тензометрических, фотоупругих, магнитоупругих и других датчиков. Следует отметить, что точность косвенных методов зависит от числа определяемых величин, числа точек, способа перехода от измеряемых величин к нагрузкам.

Методики проведения исследований на станциях Санкт-Петербургского метрополитена разрабатывались Ленинградской лабораторией ЦНИИС и ОАО «Ленметрогипротранс». Они основаны на измерении относительных деформаций бетона обделки, которые пересчитываются в напряжения в обделке и, далее, в напряжения на контакте обделки с массивом (нагрузку).

Натурные наблюдения проводились на разных станциях Санкт-Петербургского метрополитена. В качестве примера колонных станций без боковых платформ можно рассмотреть станцию «Парк Победы».

Давление на своды определялось с использованием мессдоз. Среднее давление по своду составило 140 кПа, максимальное 330 кПа. В дальнейшем давление установилось и при последнем замере, перед навеской зонтов, наметилось даже некоторое снижение как среднего, так и максимального давления (рис.1).

Контактное давление в своде левого тоннеля составляет от ρgH: наибольшее среднее давление 38,0 %, максимальное 53,3 % от расчетного, контактное давление на свод среднего тоннеля составляет от расчетного всего 15,6 %, а максимальное 36,6 %.

Наблюдения за изменением контактного давления на обделку среднего тоннеля показали:

– с момента установки колец среднего тоннеля до окончания снятия показаний по мессдозам контактное давление практически не изменялось;

– контрольное нагнетание на рост давления влияния не оказало;

– давление в своде распределяется неравномерно;

– контактное давление на обратный свод, как и на остальной поверхности обделки, распределялось неравномерно.

Давление на свод и лоток среднего тоннеля после монтажа обделки интенсивно росло в течение 6-10 сут. и достигло 60 % веса столба грунта. В дальнейшем давление продолжало расти. Через 7-8 мес. оно стабилизировалось и в среднем стало равным около $0{,}8\rho gH$.

Для изучения напряженного состояния колонных станций используется сравнительно простой метод, позволяющий ог-

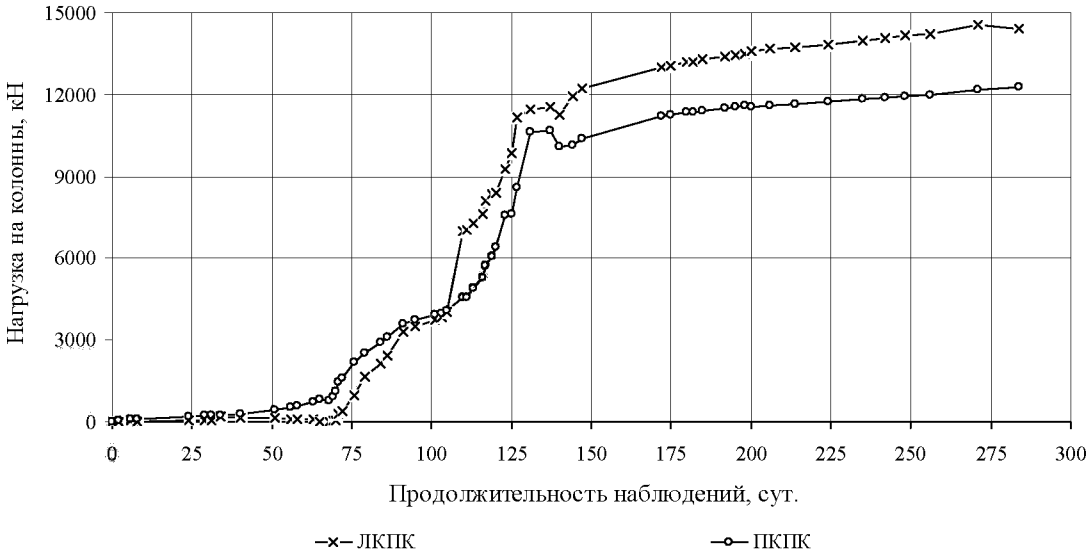


Рис.2. График формирования нагрузок на стальные колонны

раничиться исследованием работы важнейших деталей конструкции – колонн.

Каждая колонна рассматривается как своеобразная большая стойка – динамометр. Так как колонны имеют простые сечения и доступны для измерений со всех сторон, можно достаточно точно определить действующие в них нормальные силы по напряжениям в различных точках, симметрично расположенных относительно главных осей сечения.

Нормальная сила, определенная по измеренным напряжениям в колоннах, не может сильно отличаться от величины горного давления, приходящегося на грузовую площадь каждой колонны.

Полученные данные о нагрузках, приходящихся на каждую колонну в отдельности, служат материалом для оценки закономерности распределения горного давления, как по длине, так и по ширине каждой исследуемой станции.

Измерением напряжений в колоннах представляется возможным оценить не только величину действующих нагрузок, но и работу всей конструкции исследуемой станции.

Применение разных способов определения нормальной силы в колоннах показало хорошую сходимость результатов. Это позволяет говорить о том, что основное влияние на рост нагрузок на конструкции колонных станций имеют технологические факторы.

Наблюдения на колонной станции «Комендантский проспект», проводимые по струнным датчикам ПЛДС-400 в процессе строительства, позволили выявить особенности формирования напряженно-деформируемого состояния колонно-прогонных комплексов станции за указанный промежуток времени.

При разработке верхнего свода происходит активный рост нагрузок с незначительным их снижением в момент нахождения забоя на исследуемом колонно-прогонном комплексе (рис.2).

В ходе наблюдений выявлено влияние технологических процессов при проходке среднего тоннеля на формирование напряженно-деформированного состояния колонно-прогонных комплексов:

– незначительное первоначальное снижение напряжений вызвано разработкой контура верхнего свода в пределах измеряемого участка; на некоторых гранях колонн сжимающие напряжения переходят в растягивающие;

– в дальнейшем активный рост нагрузки на колонны происходит по мере замыкания верхнего свода на колонно-прогонные комплексы;

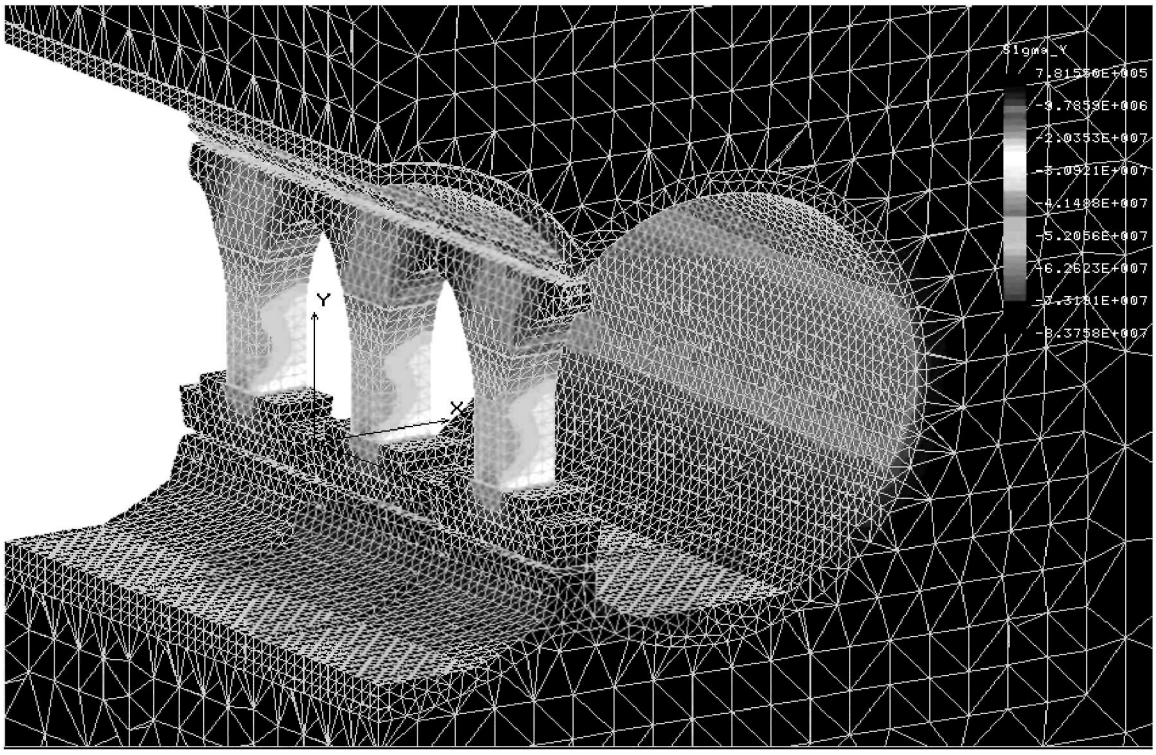


Рис.3. Картина распределения вертикальных напряжений σ_y при сооружении станции на полное сечение

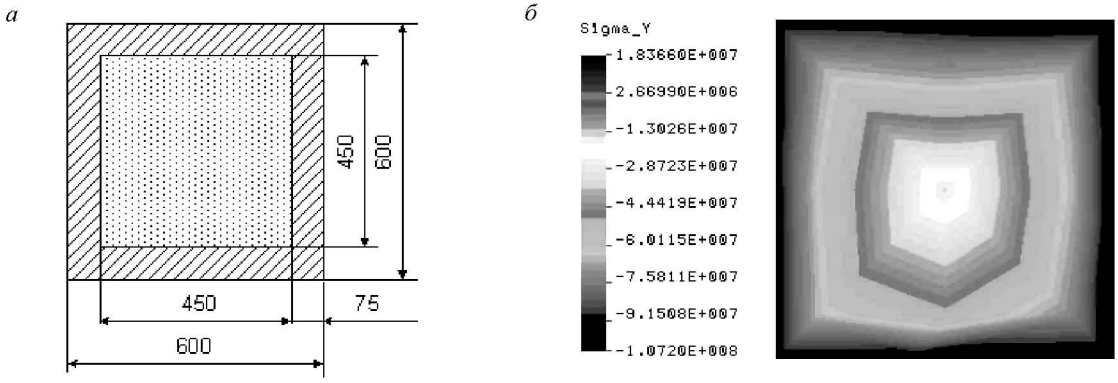


Рис.4. Типовая стальная колонна: *а* – сечение; *б* – распределение вертикальных напряжений σ_y в среднем сечении

– разборка тюбингов временного заполнения приводит к увеличению скорости роста напряжений на 25,3 МПа/мес. и 66,35 МПа/мес. на ЛКПК и ПКПК соответственно. Это объясняется передачей воспринимаемой нагрузки с тюбингов временного заполнения на колонно-прогонный комплекс;

– разработка обратного свода вызывает снижение напряжений в колоннах. Этот эффект начинает сказываться на расстоянии 3-3,75 м от измеряемого участка;

– распределение напряжений в сечении колонны происходит неравномерно: при разработке контура верхнего свода в пределах измеряемого участка, разборке тюбингов временного заполнения и разработке обратного свода вблизи измеряемого участка.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет значительно прибли-

зить расчетную схему к реальному объекту, дает возможность учесть наиболее важные свойства среды, а также учесть реальную геометрию сооружения. Использование МКЭ наиболее эффективно в тех случаях, для которых не имеется точных аналитических решений: для расчета незамкнутых и сборных обделок; для расчета обделок, расположенных в неоднородном грунтовом массиве; для учета постадийности возведения обделки.

МКЭ позволяет производить расчеты обделок не только на основе упругой модели взаимодействия их с массивом, но и с учетом нелинейности деформирования массива. В таких случаях вычисления производятся многократно (итерационным путем). На каждом шаге вносятся коррективы в величины модулей деформации элементов в соответствии с уровнем напряжений и принятой моделью упругопластического материала.

Для численного моделирования было выделено четыре этапа сооружения станции:

– разработка первого пилот-тоннеля диаметром от 5,5 до 8,5 м;

– разработка второго пилот-тоннеля диаметром от 5,5 до 8,5 м;

– установка колонно-прогонных комплексов и сооружение верхнего свода;

– разработка станции на все сечение и сооружение обратного свода.

Картина распределения вертикальных напряжений σ_y при сооружении колонной станции на полное сечение с железобетонными колонно-прогонными комплексами приведена на рис.3.

Также была создана модель колонной станции со стальными колонно-прогонными комплексами. Стальная колонна внутри заполнена бетоном.

Наибольшая концентрация вертикальных напряжений σ_y наблюдается в колоннах (рис.4). В среднем сечении колонн, на гранях напряжения достигают величины (–80)-(–95) МПа. Причем наблюдается неравномерное распределение вертикальных напряжений в сечении колонны. На грани, ближней к среднему тоннелю напряжения меньше и составляют –80 МПа, на наиболее удаленной грани напряжения больше и составляют –95 МПа.

Натурные наблюдения зафиксировали на гранях колонн величину напряжений в 75 МПа, причем стабилизация их роста еще не наступила. При численном моделировании на конечный момент стабилизации напряжений они достигли в среднем 85-90 МПа. Таким образом, была обеспечена высокая сходимость результатов расчетов с натурными наблюдениями.

Качественный геомеханический прогноз напряженно-деформированного состояния станций метрополитена и вмещающего массива возможен при комплексном подходе, включающем как численное трехмерное моделирование, так и натурные исследования, являющиеся базой для создания максимально приближенных к реальности конечно-элементных моделей.