

УДК 622.284

А.Г.ПРОТОСЕНИЯ, д-р техн. наук, профессор, (812)328-8225

П.А.ДЕМЕНКОВ, канд. техн. наук, доцент, dem-petr@yandex.ru

М.А.КАРАСЕВ, канд. техн. наук, доцент, karasevma@gmail.com

Н.А.БЕЛЯКОВ, аспирант, nike-bel@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

К.П.БЕЗРОДНЫЙ, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе, (812)712-52-52

В.А.МАСЛАК, генеральный директор, (812)712-52-52

ОАО «Ленметрогипротранс»

A.G.PROTOSENYA, Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-82-25

P.A.DEMENKOV, PhD in eng. sc., associate professor, dem-petr@yandex.ru

M.A.KARASEV, PhD in eng. sc., associate professor, karasevma@gmail.com

N.A.BELYAKOV, post-graduate student, nike-bel@yandex.ru

Saint Petersburg State Mining University

K.P.BEZRODNY, Dr. in eng. sc, deputy director in the field of scientific researches, (812) 712-52-52

V.A.MASLAK, director general, (812)712-52-52

JSC «Lenmetrogiprotrans»

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПИЛОННОЙ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С МАЛООСАДОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ СТРОИТЕЛЬСТВА

Приведена интеллектуальная технология проектирования конструкции пилонной станции метрополитена, сооружаемой по малоосадочной технологии, в которой учитываются основные этапы ввода элементов конструкций в работу. В качестве исходной принятая схема взаимодействия системы «обделка – грунтовый массив». Расчет напряженного состояния конструкций выполнен методом конечных элементов.

*Ключевые слова:* станция, обделка, грунт, крепь, модель, напряжение.

## THE DESIGNING OF THE CONSTRUCTIONS OF THE PILLAR UNDERGROUND STATION WITH APPLYING OF THE LOW-SETTLE BUILDING TECHNOLOGY

The intelligent technology of designing of the constructions of pillar underground station is adduced. Station is building with applying of low-settle technology, which takes into consideration main stages of the building process. The scheme of interaction of the system «support lining-soil massif» was accepted as basic scheme of calculations. The calculations of the stress-strain condition of constructions was performed with applying of finite-elements method.

*Key words:* underground station, permanent support lining, soil massif, temporary support lining, model, stress.

Проходка большей части станционных тоннелей метрополитена осуществляется с разработкой грунта вручную. Сложности механизации горно-проходческих работ, быстрое нарастание горного давления и значительные смещения в кровле и плоскости лба выработки приводят к осадкам земной поверхности и по-

вреждениям зданий и сооружений на ней. В последние годы значительные усилия ученых и производственников направлены на разработку таких технологий, которые позволили бы повысить уровень механизации проходческих работ и одновременно свести к минимуму осадки земной поверхности.

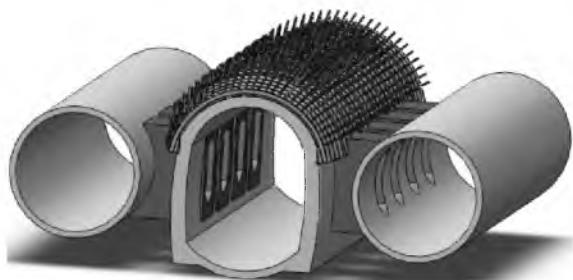


Рис.1. Конструкция временной крепи и постоянной обделки станции метрополитена глубокого заложения с криволинейными стенами станционного тоннеля

Новые технологии базируются на научно обоснованных конструктивно-технологических решениях, которые позволяют максимально механизировать, а в некоторых случаях и автоматизировать большую часть элементов проходческого цикла, достичь больших темпов проходки при высоком качестве строительных работ, существенно обезопасить производственный процесс и снизить его негативное воздействие на окружающую среду.

Современная концепция освоения подземного пространства мегаполисов в сложных градостроительных условиях основана на применении малоосадочных технологий строительства, при которых не будут превышены предельно допустимые осадки оснований зданий и сооружений и земной поверхности. Идея малоосадочной технологии строительства станции метрополитенов глубокого заложения основана на обеспечении устойчивости грунтового массива с помощью опережающего упрочнения свода и забоя, что позволяет существенно снизить осадки земной поверхности при раскрытии сечения выработок.\* При этом должна обеспечиваться высокая механизация ведения проходческих работ.

\* Протосеня А.Г. Определение пространственного напряженно-деформированного состояния слабого грунтового массива в призабойной части при проходке тоннеля с использованием пригруза забоя / А.Г.Протосеня, Н.А.Беляков // Записки Горного института. 2011. Т.190. С. 149-163.

Protosenya A.G., Belyakov N.A. The determination of the volume stress-strain conditions of the soil massif in the face area of the tunnel in conditions of drafting with using of contledge of the face // Notes of Mining Institute. 2011. Vol.190. P.149-163.

Для условий Санкт-Петербурга рассмотрена конструкция станции метрополитена пилонного типа, средний станционный тоннель которой имеет монолитное исполнение, и выполнено ее геомеханическое обоснование. Тоннель представляет собой выработку сводчатой формы, ее высота в свету составляет 10,5 м, ширина 7,3 м. Боковые тоннели имеют обычное исполнение, принятое при строительстве пилонных станций метрополитенов глубокого заложения, диаметр вчерне 8,5 м.

Стены среднего тоннеля на предварительном этапе рассматривались прямолинейными. Расчеты показали, что такая форма станционного тоннеля приводит к образованию значительных растягивающих напряжений в боках обделки тоннеля и на участках сопряжения свода и стен, стены и лотка. В дальнейшем к рассмотрению принималась конструкция среднего станционного тоннеля с некоторой кривизной стен (рис.1).

Малоосадочная технология строительства среднего станционного тоннеля обеспечивается за счет передового крепления забоя тоннеля фиберглассовыми анкерами, а свода тоннеля – металлическими трубами с заполнением их бетонным раствором. Средний станционный тоннель сооружается уступным способом в два этапа. На первом этапе проводится сводовая часть тоннеля под защитой временной опережающей крепи. Кроме того, временная крепь из фиберглассовых анкеров устанавливается впереди лба забоя. Опережающая крепь в своде устраивается из металлических труб диаметром 60-200 мм, толщиной стенки от 4 до 8 мм. Длина металлической трубы обычно находится в диапазоне от 12 до 15 м. Длина участка тоннеля, разрабатываемого под защитой временной крепи, составляет 6-12 м. Внутренняя полость трубы заполняется бетоном. Опережающая крепь из металлических труб имеет наклон относительно продольной оси тоннеля в пределах 7-11°, его значение зависит от принятого проходческого оборудования.

С отставанием 0,4 м от лба забоя тоннеля возводят металлические арки, выполненные из двутаврового профиля, таким образом, чтобы металлические трубы опережающего крепления опирались на них и

передавали нагрузку от массива. В целом такая схема временного крепления тоннеля позволяет максимально уменьшить смещения его контура и осадку земной поверхности, что в конечном итоге обеспечит устойчивость тоннеля.

Для выполнения численного моделирования процесс строительства пylonной станции был разбит на шесть основных этапов, оказывающих наибольшее влияние на формирование напряженно-деформированного состояния ее конструкций. На каждом этапе осуществлялось постепенное подвигание забоя и возвведение крепи. Каждый этап разбивался на расчетные шаги для моделирования постепенного подвигания забоя и включения в работу конструкций. Всего в модели было выделено 110 шагов расчета.

Аналогичный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций станций колонного типа методом конечных элементов был реализован в работе П.А.Деменкова.\*

Размеры разработанной конечно-элементной модели (рис.2) определялись с учетом зон влияния выработок и составили соответственно: 100 м в направлении оси  $X$ ; 100 м в направлении оси  $Y$ ; 30 м в направлении оси  $Z$ . Глубина заложения выработки 50 м, длина 16 м (20 двутавровых полигональных арок с шагом расстановки 0,8 м). Сетка конечных элементов сгущается вокруг станции и укрупняется к периферии модели. При моделировании использовались твердотельные четырехузловые и оболочечные элементы. Количество элементов в модели составило 410 000. Разработанная модель учитывает влияние последовательности ведения проходческих работ и порядка установки временной крепи и постоянной обделки на напряженное состояние элементов конструкций станции.

\* Деменков П.А. Влияние технологии на формирование нагрузки при строительстве колонной станции Санкт-Петербургского метрополитена «Комендантский проспект» // Записки Горного института. СПб, 2004. Т.155. С.102-105.

Demenkov P.A. The influence of building technology on forming of the load in conditions of the underground column-type station «Komendantsky prospect» of Saint-Petersburg underground // The Proceedings of Mining Institute. Saint Petersburg, 2004. Vol.155. P.102-105.

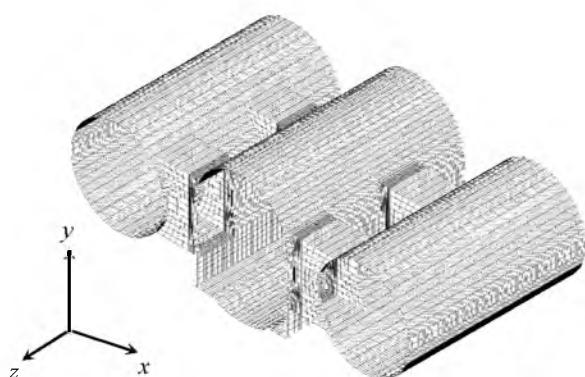


Рис.2. Фрагмент сетки конечно-элементной модели станции

В модели рассмотрены шесть основных этапов проходки и крепления станционных тоннелей.

*Первый этап строительства (I).* На первом этапе строительства выполняется проходка верхнего свода среднего зала станции на временном креплении (экран из труб диаметром 90 мм, толщиной 10 мм и полигональные арки из двутавра № 30) (рис.3). Размер заходки 0,8 м. С отставанием от забоя на 0,8 м возводится временная крепь из двутавра, которая замоноличивается тощим бетоном класса В 25.

*Второй этап строительства (II).* На этом этапе производится разработка уступа среднего тоннеля с последующей установкой постоянной обделки из монолитного железобетона заходками по 2 м (верхний свод и ядро одновременно). Высота уступа ядра 6 м. Первоначальная толщина обделки принималась равной 0,4 м, в дальнейшем она была увеличена до 0,5 и 0,6 м.

*Третий этап строительства (III).* Разработка и возвведение постоянной обделки обратного свода среднего тоннеля производится заходками по 2 м. Высота нижнего уступа 2,8 м.

*Четвертый этап строительства (IV).* На данном этапе строительства сооружается левый боковой тоннель. Его проходка моделировалась заходками по 2 м.

*Пятый этап строительства (V).* Моделирование строительства правого бокового тоннеля выполнялось аналогично строительству левого тоннеля на предыдущем этапе.

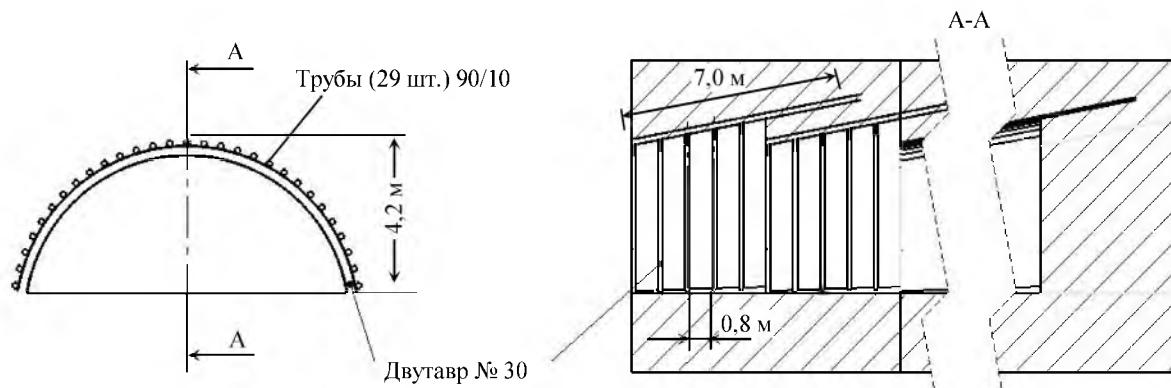


Рис.3. Конструкция временной крепи: арка и опережающий экран из труб

*Шестой этап строительства (VI).* На последнем этапе производят раскрытие и бетонирование проемов. Проемы сооружают с каждой стороны среднего тоннеля последовательно, начиная со стороны левого тоннеля. Всего было смоделировано раскрытие четырех проемов.

Напряженно-деформированное состояние и параметры конструкции обделки трехсводчатой станции метрополитена и временной крепи определяются на основе учета совместной работы обделки и временной крепи, этапов раскрытия поперечных сечений тоннелей и армирования грунтового массива.

В разработанной дискретной конечно-элементной модели малоосадочной трехсводчатой станции имелось 20 полигональных арок из двутавра № 30 временной кре-

пи. Нумерация арок и проемов соответствует порядку их установки и разработки. Для анализа напряженного состояния временной крепи наибольший интерес представляли арки, расположенные посередине целика и проема.

Значения напряжений в арках определялись с одной стороны, в трех точках (рис.4).

В нижней части арки по мере подвигания забоя верхнего свода среднего тоннеля напряжения возрастают, достигая максимальных значений 15 МПа. В своде и в боку арки при нахождении забоя в непосредственной близости от нее напряжения достигают максимальных значений соответственно 57 и 48 МПа. По мере удаления забоя они значительно снижаются: до 23 МПа в своде и до 19 МПа в боку. Эту разгрузку арок можно объяснить вступлением в работу постоянной обделки среднего тоннеля.

Разработка обратного свода и проходка первого бокового тоннеля никаких существенных изменений в напряженном состоянии арки не вызывают.

При разработке второго бокового тоннеля наблюдается некоторое снижение напряжений во всех точках замеров.

Разработка первых двух проемов не оказывает значительного влияния на формирование напряженного состояния арки. Происходит небольшое перераспределение напряжений: увеличение на 2 МПа в верхней части арки и снижение на такую же величину в боку. Разработка третьего и четвертого проемов приводит к обратной ситуации: в своде наблюдается снижение, а в

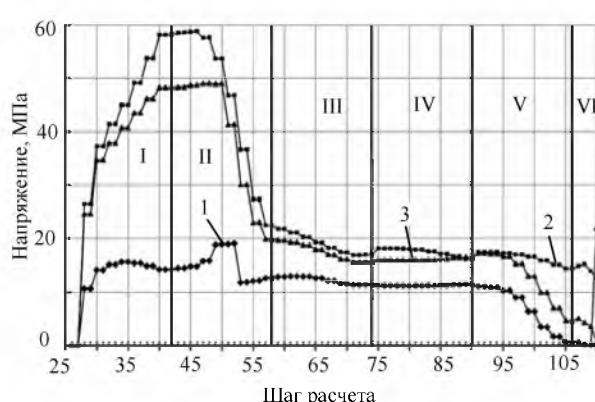


Рис.4. Формирование напряжений в средней арке по проему между тоннелями на различных этапах строительства

1 – низ арки; 2 – верх арки; 3 – бок арки

боку увеличение, при этом возникает резкий скачок напряжений в нижней части арки с 7 до 86 МПа.

На конечном этапе строительства напряжения в своде арки составили 13 МПа, а в нижней части достигли 86 МПа. Места перехода растягивающих напряжений свода в сжимающие (низ) расположены в боках арки. Значения напряжений там близки к нулю.

Выполнен расчет напряжений в железобетонных конструкциях пилонной станции метрополитена (рис.5). Анализ результатов расчетов показывает, что при раскрытии обратного свода среднего тоннеля в нижней части бока обделки наблюдается увеличение напряжений.

При разработке левого бокового тоннеля наблюдается небольшой рост напряжений на внутренней поверхности обратного свода и резкий рост – при разработке правого бокового тоннеля. При этом на наружной поверхности с некоторого момента сжимающие напряжения равны нулю.

При раскрытии проемов наблюдается полная стабилизация сжимающих напряжений (8 МПа) на внутреннем контуре обратного свода. При этом на внутреннем контуре в боках на этом этапе происходит скачкообразный рост сжимающих напряжений.

На внутренней поверхности свода среднего тоннеля в течение всего периода строительства происходит равномерный рост сжимающих напряжений, но их значения невелики – порядка 1 МПа.

В целом из расчета следует, что тангенциальные напряжения сжатия на последнем этапе строительства, равно как и на всех

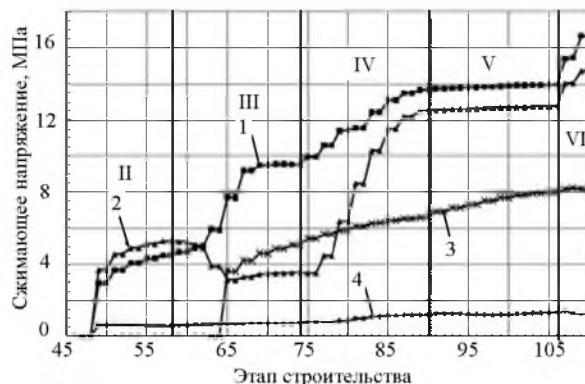


Рис.5. Формирование тангенциальных сжимающих напряжений по внутренней поверхности обделки на различных этапах строительства станции

1 – низ бока; 2 – середина бока; 3 – обратный свод; 4 – свод

предыдущих этапах, не превышают расчетного предела прочности бетона класса В35 на сжатие.

Рассмотренная конструкция трехсводчатой пилонной станции, сооружаемой по малоосадочной технологии, рекомендуется к строительству в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях мегаполисов.

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».