УДК 622.831

Н.И.КУЛАГИН, К.П.БЕЗРОДНЫЙ
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
М.О.ЛЕБЕДЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАНЦИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены результаты длительных исследований формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов станций Санкт-Петербургского метрополитена. Полученные данные свидетельствуют о продолжении роста нагрузок на обделки в процессе эксплуатации. При установившемся горном давлении на конец наблюдений продолжается перераспределение напряженного состояния в поперечном сечении станций.

The results of prolonged research of station structural elements deflected mode generation for Saint-Petersburg subway are given. The Obtained data indicates a further rising of load on lining during exploitation. At the end of observation, under the steady-state mining pressure, redistribution of stress condition at the station cross-section continues.

В процессе строительства станций Санкт-Петербургского метрополитена (1983-1997) были смонтированы замерные станции, оснащенные датчиками различного типа для исследования НДС конструкций, горного давления на них, изменения их величин во времени. Ряд реализованных конструкций являются пионерными с соответствующей необходимостью натурных исследований для уточнения расчетных положений, заложенных в проекте.

Цель длительных исследований – поддержание безопасного состояния существующих сооружений Петербургского метрополитена. Кроме того, очевидна также необходимость исследований распределения НДС конструктивных элементов в процессе эксплуатации подземных сооружений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ материалов выполненных измерений;
- осуществлен подбор материалов инженерно-геологических условий для каждого опытного участка;
- выполнена ревизия замерных станций;
- проведены измерения;
- уточнены расчетные положения;
- осуществлена обработка и анализ полученных результатов измерений.

Длительные исследования проводятся на станциях «Спортивная», «Адмиралтейская», «Проспект Просвещения», «Крестовский остров», «Площадь Александра Невского-2». Необходимо сразу отметить, что определение «длительные исследования» включает время, начиная с 2000 г., когда работы начали выполняться институтом «Ленметрогипротранс».

Более подробно рассмотрим работу конструктивных элементов двух станций – «Спортивная» и «Адмиралтейская».

Станция «Спортивная». Одним из исследуемых конструктивных элементов станции является верхний свод из гладких блоков 10,5НБО и 15ВБД, включающий две полуарки (рис.1).

Блоки обделки оснащены закладными струнными датчиками ПЛДС-400. Общее количество оснащенных датчиками блоков – 16, из них: 12 – блоки 10,5НБО, 4 – блоки 15ВБД. В каждый блок 10,5НБО вмонтировано по одному датчику. Датчики расположены в середине поперечного сечения блока. В каждый блок 15ВБД вмонтировано по два датчика, расположенных на вертикальной оси блока на расстоянии 40 см друг от друга (рис.1). Установка датчиков выполнена при изготовлении блоков на заводе железобетонных конструкций и деталей Ленметростроя.

Кроме того, 8 торцевых сечений блоков в этих полуарках оснащены магнитоупругими датчиками Ц-24, установленными по определенной схеме.

Анализ развития НДС верхнего свода во времени показал следующее:

1. Основная часть напряженного состояния блоков, связанная с ростом горного давления, формируется в течение первых четырех месяцев после разжатия колец и дальнейшей разработки сечения станционного узла (рис.2). За этот период реализовано $0{,}95\gamma H$.

2. В дальнейшем интенсивность увеличения напряженного состояния снижается и рост деформаций в железобетонных элементах верхнего свода продолжается за счет ползучести бетона и грунтового массива. Однако с увеличением скорости роста деформаций отмечается еще один участок, соответствующий моменту пуска участка метрополитена в эксплуатацию.

3. В ходе наблюдений исследовалось развитие эксцентриситетов приложения нормальной силы в блоках 15ВБД, в которых размещалось по два датчика ПЛДС в вертикальной плоскости по обе стороны от оси сечения блока. При достаточно больших эксцентриситетах при загружении конструкции через 100 суток их показания не превышали 4,5 см.

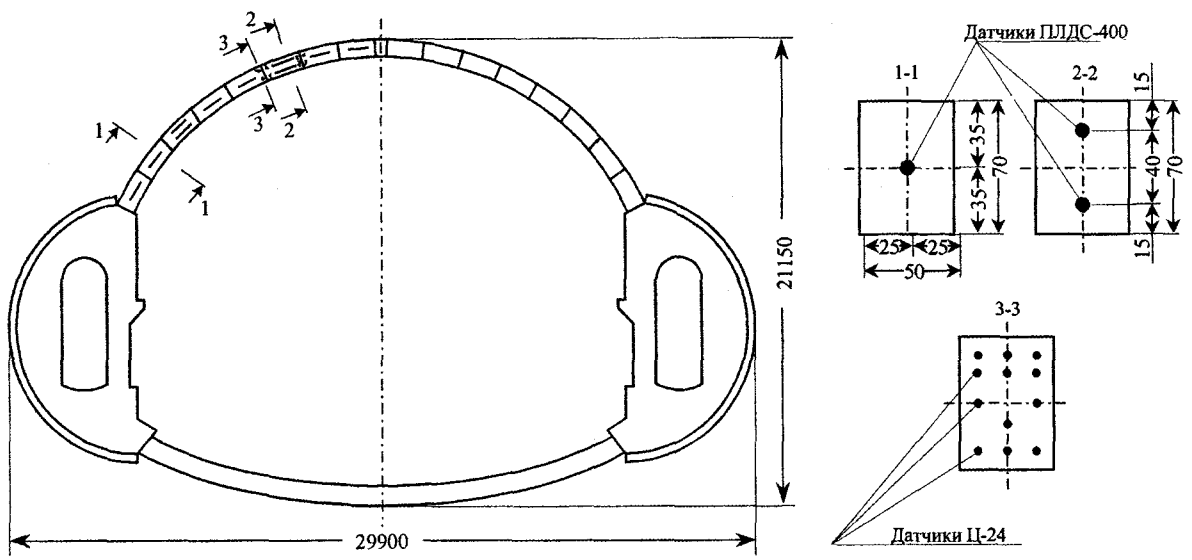


Рис.1. Размещение блоков с датчиками в кольцах верхнего свода и датчиков в поперечном сечении блоков

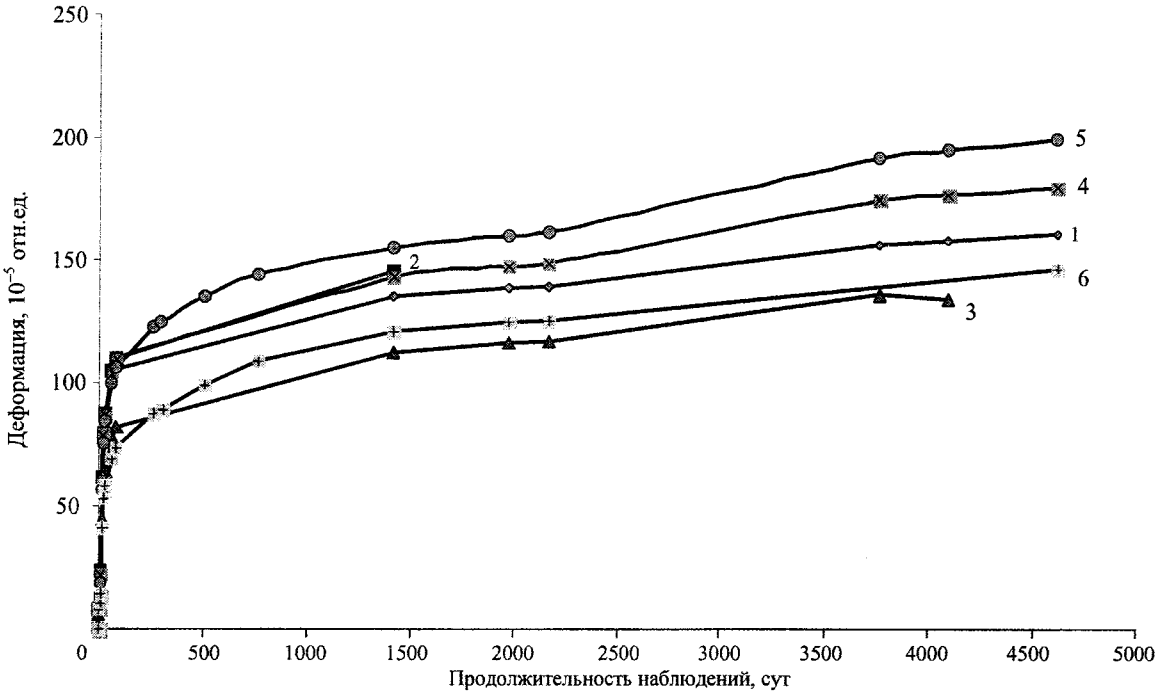


Рис.2. График развития относительных деформаций бетона в блоках верхнего свода кольца № 314

1 – блок 8; 2 – блок 7; 3 – блок 5; 4 – блок 4; 5 – блок 2; 6 – блок 1

4. Оснащение торцевых сечений блоков магнитоупругими датчиками позволило выявить особенности перераспределения напряжений в стыках обделки. Выполненные серии измерений после длительного периода эксплуатации станции показали, что с 1997-2001 гг. в верхней половине сечения блоков наблюдается увеличение напряжений (в среднем на 0,9 МПа) и уменьшение на 0,5 МПа – в нижней половине сечения блоков, так как происходит изменение эксцентриситета приложения усилий в торцах блоков.

Станция «Адмиралтейская». Станция представляет широко применяемую в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга трехсводчатую конструкцию из сборного железобетона, своды которой замыкаются на два колонно-прогонных комплекса, состоящих из двухконсольных стальных ригелей коробчатого поперечного сечения с криволинейным нижним поясом, стальных колонн коробчатого сечения с опорным стальным башмаком и нижнего прогона из сборного железобетона (рис.3).

Новизной при строительстве станции являлось возведение опережающей крепи при проходке верхнего свода среднего тоннеля, основной задачей которого было снижение осадок земной поверхности. Принцип возведения опережающей крепи заключается в прорезании опережающей щели в грунтовом массиве, заполнении ее прочным быстротвердеющим составом и ведении под защитой этой крепи проходческих работ с возведением постоянной обделки.

В процессе строительства, по длине станции, датчиками было оснащено 4 опытных участка. Датчики были размещены в конструкции опережающей крепи, тюбингах боковых тоннелей, колонно-прогонных комплексах – на ригелях и колоннах (рис.4), нижнем прогоне, верхнем и обратном сводах среднего тоннеля.

Анализ развития НДС конструктивных элементов станции во времени показал следующее:

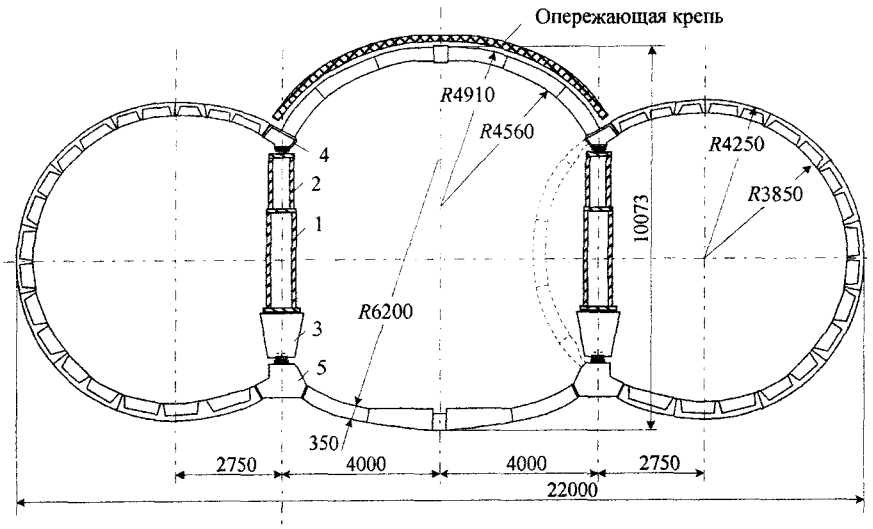


Рис.3. Поперечное сечение станции колонного типа из сборного железобетона

1 – стальная колонна; 2 – стальной ригель; 3 – нижний прогон; 4 – блок ОЧС; 5 – блок ФБС

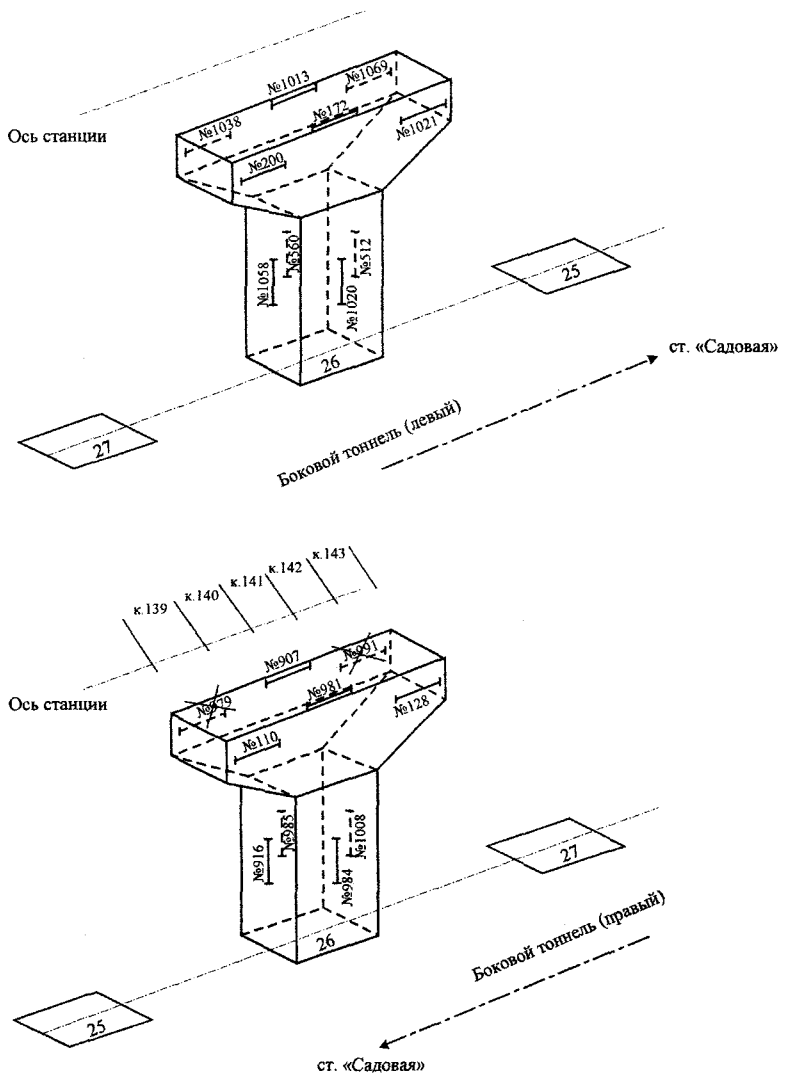


Рис.4. Размещение измерительных приборов на колонно-прогонных комплексах

1. Опережающая крепь выполняет свое предназначение до возведения верхнего свода и ввода его в работу, а затем выключается из работы из-за отсутствия опоры в пятовой части.

2. Напряжения в железобетонных блоках верхнего свода достигают 14,36 МПа.

3. Напряжения в железобетонных тюбингах боковых тоннелей составляют в среднем 29,4 МПа правого тоннеля и 19 МПа (при максимальной величине 30 МПа) левого тоннеля. Проведение длительных исследований показало увеличение скорости роста напряжений (за 1470 дней) до 0,12 МПа/месяц, что несколько больше предыдущих показателей. В левом тоннеле произошло увеличение скорости роста деформаций до 0,14 МПа/месяц.

4. В соответствии с длительными исследованиями можно отметить существенное изменение характера развития деформаций по отдельным датчикам в нижнем ригеле, которые расположены как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Несмотря на различный характер развития деформаций в разных сечениях по этапам строительства станций, длительные исследования свидетельствуют о тенденции к изменению деформаций (на сжимающие) во всех исследуемых сечениях ригеля.

5. В соответствии с первой серией проведения длительных исследований на колонно-прогонных комплексах на гранях правой и левой колонн со стороны боковых тоннелей отмечается снижение напряжений на 35,7 и 39,5 МПа соответственно (рис.5). На остальных гранях колонн наблюдается увеличение напряжений, а также рост напряжений в левом колонно-прогонном комплексе: в среднем в 2,7 раза больше, чем в правом. Следующие серии измерений свидетельствуют о снижении скоростей роста напряжений и о стабилизации НДС. Однако перераспределение напряжений в сечении колонн еще происходит.

Снижение напряжений на грани правой колонны со стороны бокового тоннеля повлияло на снижение эксцентриситета приложения усилий к колонне, который составил 1,1 см (до проведения длительных ис-

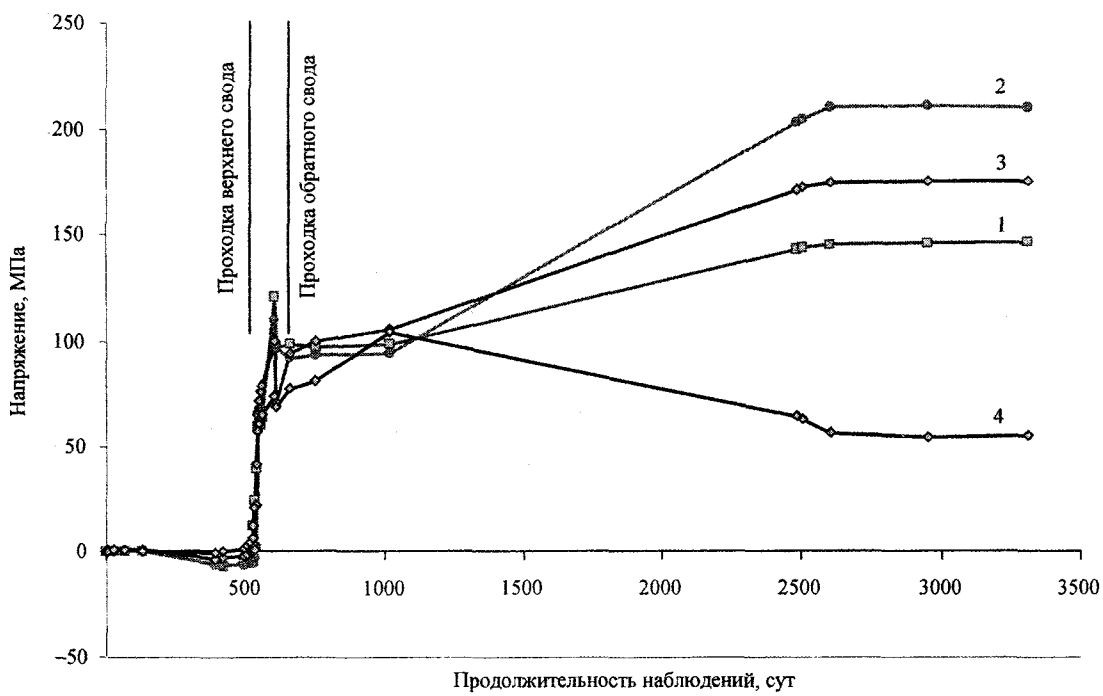


Рис.5. Кривые развития напряжений на гранях колонны левого колонно-прогонного комплекса № 26 (нумерация датчиков в соответствии с рис.4)

1-4 – показатели датчиков 512, 560, 1058 и 1020 соответственно

следований эксцентриситет – 3,1 см). Бóльшее увеличение напряжений на грани колонны со стороны проходки среднего зала повлияло на увеличение эксцентриситета приложения усилий в колонне вдоль станции, который составил 2,4 см (до проведения длительных исследований эксцентриситет – 1,7 см).

Снижение напряжений на грани левой колонны со стороны бокового тоннеля повлияло на увеличение эксцентриситета приложения усилий к колонне, который составил 3,8 см (до проведения длительных исследований эксцентриситет – 0,5 см). Бóльшее увеличение напряжений на грани колонны со стороны, противоположной проходке среднего зала, повлияло на увеличение эксцентриситета приложения усилий в колонне вдоль станции, который составил 0,6 см (до проведения длительных исследований эксцентриситет –0,2 см).

6. На конец 2003 г. среднее значение нормальных радиальных напряжений на контакте обделки станции с массивом (по сводовой части) относительно оси станции составило:

- по правой стороне 0,885 МПа ($0{,}54\gamma H$); в 1997 г. контактные напряжения были равны 0,786 МПа ($0{,}48\gamma H$);
- по левой стороне 1,280 МПа ($0{,}88\gamma H$); в 1997 г. контактные напряжения были равны 0,876 МПа ($0{,}53\gamma H$).

Можно отметить увеличение неравномерности распределения контактных напряжений относительно оси станции.

7. Напряжения в железобетонных блоках обратного свода достигают 12,6 МПа.

Обобщенный анализ развития НДС конструкций наблюдаемых станций Санкт-Петербургского метрополитена за рассматриваемый период позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Затухание развития НДС на всех опытных участках с предыдущим значительным увеличением подтверждает предположение о том, что на увеличение скорости роста НДС влияют вибрации, возникающие при движении поездов. Эти вибрации передаются через обделку на массив, вследствие чего возникает виброуплотнение грунтов. Продолжающиеся процессы развития НДС связаны с виброползучестью окружающего массива протерозойских глин и бетона обделок.

2. Напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов станций не превышает расчетных величин. В тюбингах боковых тоннелей станции «Адмиралтейская» и блоках верхнего свода станции «Спортивная» нормальные тангенциальные напряжения в бетоне близки к пределу прочности. На остальных опытных участках нормальные тангенциальные напряжения в бетоне значительно меньше предела прочности бетона.

3. На всех наблюдаемых участках отмечается снижение интенсивности роста НДС, т.е. происходит стабилизация.

4. Проведенный анализ НДС на станциях «Адмиралтейская» и «Спортивная» позволяет заключить, что при установившемся горном давлении продолжается перераспределение напряженного состояния в поперечном сечении станций.

5. На станции «Крестовский остров» отмечается стабилизация НДС у торцевой стены, где приращение деформаций в колонне равно нулю, и продолжаются процессы роста напряженного состояния конструктивных элементов, расположенных дальше от торцевой стены, но, как отмечено ранее, происходит затухание этих процессов.

6. На станциях «Проспект Просвещения» и «Площадь Александра Невского-2» по всем конструктивным элементам, оснащенным датчиками, отмечается стабилизация НДС.