

УДК 622.272

С.В. Мазеин, А.С. Вознесенский

**ВЛИЯНИЕ НАГРУЗОК ОТ ЩИТА НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ
ДЕФОРМАЦИЮ ЗДАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ
ВДОЛЬ ТРАССЫ ТОННЕЛЯ**

Семинар № 3

Проходка тоннелей щитами роторного типа с гидро- или грунтопригрузом забоя и блочной тоннельной обделкой используется как безосадочный для городской поверхности способ строительства, почти полностью вытеснивший другие способы для первичного поддержания забоя и водного баланса, такие как кессонирование и механическое удерживание. Большая часть величины осадок городской поверхности вызывается после подвижки щита при современной проходке из-за конусности оболочки щита и заполнения твердеющим раствором строительного зазора за обделкой. Первичные осадки поверхности над строящимся тоннелем вызываются ослаблением забоя при его удерживании бентонитовой супензией и разработке ротором. При равномерной (без простоев) проходке, контролирующей давление бентонита и ротора на забой, и тщательном заполнении пространства зазора, проводимом синхронно с подвижкой щита, можно проводить процессы строительства тоннеля с минимальными осадками.

Строительство линейных подземных сооружений, таких как тоннели, неизбежно вызывает сдвижения и деформации грунтового массива, которые, достигая земной поверхности,

по своим значениям иногда превышают допустимые. Это может повлечь за собой создание аварийной ситуации, особенно опасной в условиях плотной застройки территорий. Поэтому, в целях безопасности проходческих работ и охраны объектов поверхности, осуществляется мониторинг процессов сдвижений и деформаций.

При сдвижении грунтов под влиянием подземного объекта происходит их разуплотнение и перемещение в сторону выработанного пространства, при этом направление смещения по мере движения изменяется. Одновременно на земной поверхности может образоваться микромульда вследствие процесса выдавливания грунта в забой тоннеля. Таким образом, полные сдвижения и деформации складываются из вызванных потерей грунта и его выдавливанием в призабойную часть тоннеля, описанных в работе [1].

Основными критериями при выборе технологии, обеспечивающей охрану зданий и сооружений, безопасность работ, а также принятия своевременных профилактических мер являются оседания земной поверхности. Для контроля за развитием процессов этих деформаций, в соответствии с действующими нормативными документами [2], которые уже существен-

но устаревают с развитием прогрессивных способов тоннелестроения [3], непосредственно в зоне влияния проходческих работ закладываются наблюдательные станции. Нередко из-за неправильной их ориентации, больших интервалов времени между измерениями и недостаточной точности замеров они не могут полностью обеспечить свое основное назначение по обнаружению признаков недопустимых деформаций и оперативное получение информации, необходимой для принятия эффективных мер защиты. Так, при закладке профильных линий только поперек направления проходки тоннеля может быть пропущен момент образования вторичной мульды сдвигений.

Цель данного исследования - отображение реального влияния тоннельного строительства механизированными щитами на существующие объекты поверхности с помощью ориентированной по направлению проходки, автоматизированной системы реперов и высокоточного теодолита. При этом решаются следующие задачи:

- оценка возможностей технического обеспечения и системных ошибок геодезического мониторинга,
- исследование закономерностей влияния щитовых нагрузок на деформацию здания, расположенного на поверхности,
- определение направлений дальнейших исследований деформаций поверхности вдоль трассы тоннеля для окончательной разработки методики прогнозирования осадочных явлений на поверхности при работе щита.

1. Техническое обеспечение мониторинга поверхности над тоннелем

Одной из современных технологий геодезического мониторинга при подземном строительстве в Москве является система «Циклоп», примененная в качестве контроля на здании Алексеевского училища и здания МГТУ им. Баумана при проходке Лефортовского тоннеля. Система «Циклоп» французской фирмы “Sol Data” включает в себя следующие основные узлы: высокоточный автоматизированный теодолит – тахеометр, наблюдаемые марки-отражатели, установленные на исследуемом здании, направляющие марки-отражатели, программное обеспечение для компьютерной обработки результатов измерений. Система «Циклоп» реализует схему определения плановых полярных координат X и Y путем многократно повторяемых измерений дальности от полюса (теодолита) до наблюдаемых марок и направлений на них. Высотное положение Z наблюдаемых марок определяется из тригонометрического нивелирования и использованием дальностей и вертикальных углов наклона. Теодолит «опрашивает» каждые 15 минут одновременно как наблюдаемые деформационные, так и направляющие марки-отражатели. Также при условиям повышения точности теодолит устанавливают от исследуемого сооружения на расстоянии не более 50-60 м, то есть иногда в зоне расчетной мульды осадок. Это может привести к искажению результатов измеренных значений деформаций сооружения за счет неизвестных, но при этом неизбежных смещений самого теодолита-таксиметра. Для учета и исключения этого обратными засечками относительно направляющих марок-отражателей, расположенных за пределами мульды осадок, определяют положение тео-

Среднее значение и стандартное отклонение измерения вертикальных деформаций

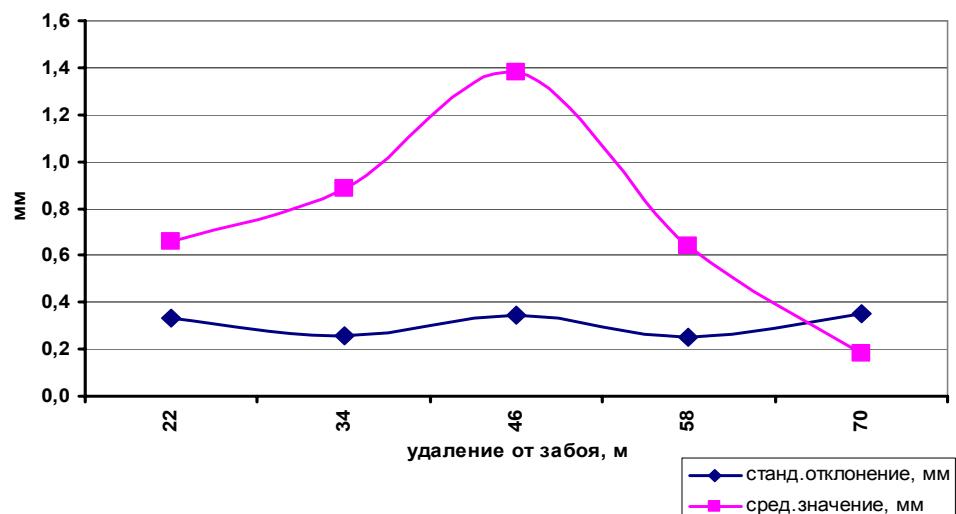


Рис. 1. Характеристики измерения вертикальных деформаций от близости забоя

долита и вводят поправки в его координаты, выполняя тем самым его виртуальную переустановку. Поправки вычисляют, исходя из статистической обработки (по способу наименьших квадратов) минимизации суммы квадратов флюктуаций ΔX , ΔY и ΔZ , используя многократно повторяющиеся измерения дальности, горизонтальных направлений и вертикальных углов на направляющие марки-отражатели. Все вычисления выполняются в автоматизированном режиме компьютером по специально разработанным программам.

По данным фирмы "Sol Data" среднеквадратическая ошибка определения деформаций из многократных измерений не превышает $\pm 0,5$ мм на расстоянии до 60 м при влиянии осадок на теодолит [4]. Проведенное нами исследование погрешности измерения вертикальных деформаций

непрерывно в течение 6 часов (за 1 проходческий цикл) по реперам, горизонтально удаленным от проекции центра забоя по проекции на ось трассы на 22-70 м, показало при проходке без остановок следующее. Стандартное отклонение измеряемых вертикальных деформаций в среднем составляет 0,3 мм (от 0,25 до 0,35 мм). При этом график средних значений деформаций от близости забоя имеет ярко выраженный максимум на расстоянии около 46 м, который выше ошибки измерений, при этом вертикальные перемещения в пределах погрешности измерений стремятся к нулю на удалении от забоя более 58 м (рис. 1).

2. Влияние щитовых нагрузок на деформации поверхности

Данное исследование вертикальных деформаций, которые были измерены по 5 реперам в конце 2002

года системой «Циклог» на колоннах здания МВТУ им. Баумана, расположенного в левом крыле мульды осадок вдоль трассы Лефортовского тоннеля, при щитовой проходке диаметром 14,2 вызывает большой научно-практический интерес (рис. 2). Впервые в отечественной практике

отслеживались: деформации - каждые 15 минут, показатели работы щита – каждые 10 секунд с последующим усреднением за цикл проходки 2 м. Величина породного перекрытия из четвертичных песчаных отложений на исследуемом участке изменялась от 17 до 14 м.

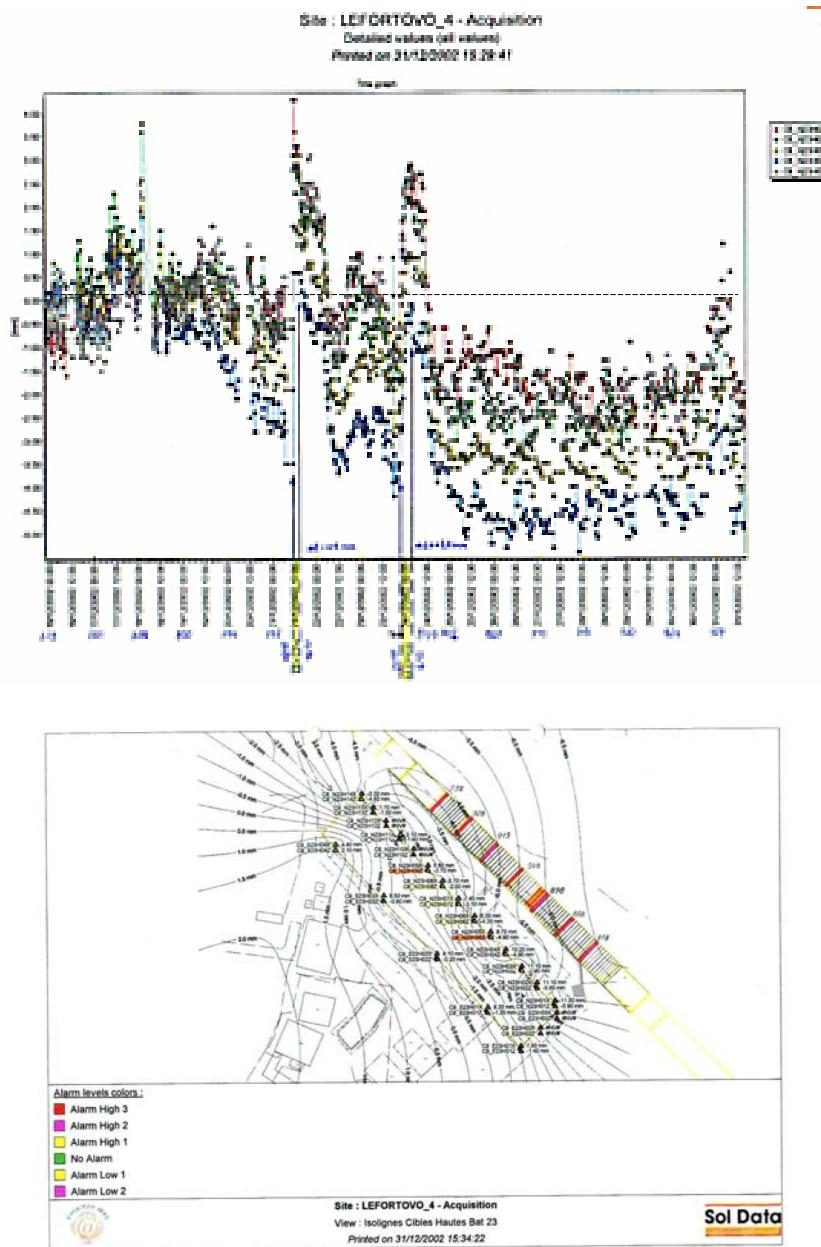


Рис. 2. Данные измерений системой «Циклоп» вертикальных деформаций здания

При этом были отслежены следующие параметры работы щита: скорость продвижения, а также нагрузки ротора и поддерживающей среды на забой. Проанализирован

факт трехдневной остановки щита с двукратным дополнительным надавливанием забоя сжатым воздухом во время двух циклов кессонных работ

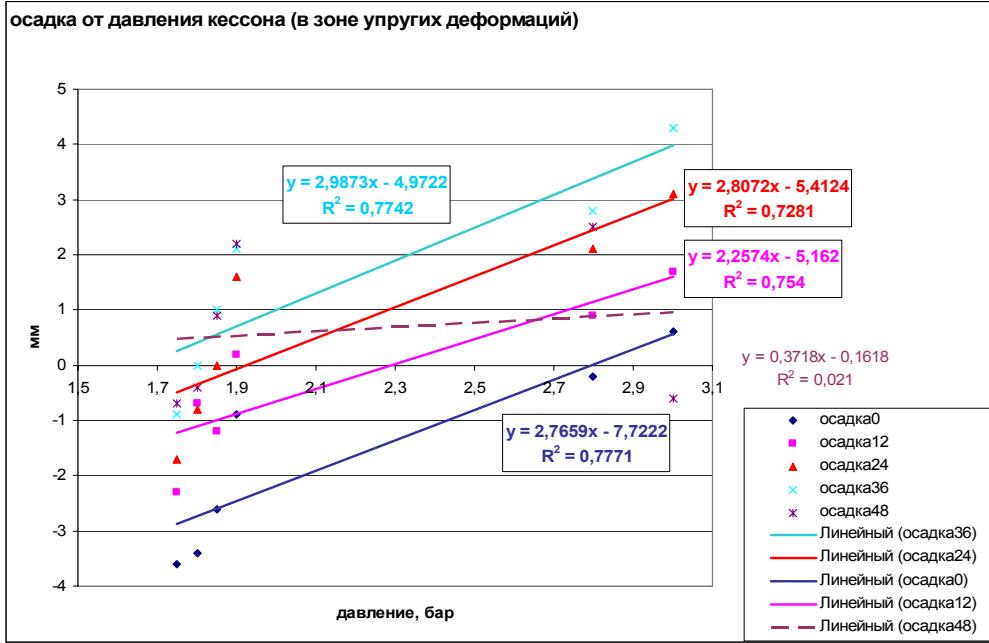


Рис. 3. График поднятия городской поверхности от давления кессона

по замене режущего инструмента ротора.

Тщательное сопоставление показателей вертикальных деформаций и нагрузок на забой во времени и пространстве позволило проследить ряд закономерностей развития деформаций при проходке слоистого массива щитом большого диаметра с песчаным породным перекрытием толщиной, равной около 1 диаметра тоннеля.

2.1. Влияние кессонного пригруза. Было замечено, что увеличение давления на забой путем снижения уровня бентонита в забойной камере и замещения объема бентонита в камере сжатым воздухом повышенного давления (от 1,7 до 3 бар) вызывает поднятие земной поверхности на 3-4 мм перед забоем в зоне от 0 до 36-42 м по линейной зависимости. При этом средний тангенс наклона данных прямых составляет 2,71 мм/бар. Данный показатель можно

применять для прогнозного расчета поднятия поверхности во время дополнительного надавливания забоя ротором и поддерживающей средой при сходных условиях геологии и заложения тоннеля. Вертикальная деформация измерялась на удалении от строящегося кольца на 0, 12, 24, и 36 м (от забоя на -8, 4, 16, 28 м) по проекции на ось тоннеля. Для деформации репера, находящегося в удалении от забоя на 40 м, такой зависимости не обнаружено (рис. 2). Данный репер находится на луче от центра забоя, который образует угол с горизонтальной плоскостью менее 28 градусов, то есть меньше, чем средний угол внутреннего трения в грунте.

Упругие деформации поверхности предлагается учитывать при задании давления кессона, очертив зону влияния данного вида нагрузок. На земной поверхности перед забоем эта

зона ограничена линией пересечения поверхности рельефа с конусообразной плоскостью скольжения подрабатываемого грунта, вершина которой находится в центре забоя, под углом внутреннего трения грунта.

По предлагаемым на рис. 3 формулам, которые вычислены с достоверностью 0,95 при критической для 6 точек построения величиной достоверности аппроксимации $R^2=0,723$, можно осуществлять прогноз поднятия-опускания дневной поверхности при кессонных работах со сжатым воздухом и проходческом цикле с роторной нагрузкой.

2.2. Влияние нагрузок ротора и последствий кессонного пригруза. Было замечено, что при проходке до и после кессонных работ усилие прижима ротора к забою в среднем уменьшилось на 11 %, а размах этого показателя увеличился с 34 до 44 % (рис. 4). Это говорит (при неизменной геологической обстановке) о факте разрыхления, повышения неоднородности и общем снижении сцепления пород перед ротором после кессонирования с двумя скачкообразными поднятиями давления в забое, сопровождающимися замещением бентонитовой сuspензии сжатым воздухом при возможном дренировании воздуха в грунтовый массив [5]. Усилие прижима ротора рассчитывалось по давлению на домкраты перемещения привода ротора за вычетом нагрузки от поддерживающей забой среды (бентонита). Прямая зависимость усилия прижима F (МН) от сцепления μ (кН/м) видна:

была получена при проходке Серебряноборских тоннелей со сходной геологией (рис. 5). Небольшие отрицательные значения усилия прижима

на рис. 5 объясняются влиянием не учтенной горизонтальной составляющей веса ротора и привода при движении щита под отрицательным уклоном.

При детальном анализе графиков зависимостей осадки перед щитом, образующейся до и после остановки на кессонные работы, от усилия прижима ротора выявлены следующие закономерности (рис. 6):

- зависимости имеют полиномиальный характер 2 порядка, где прослеживаются максимальные осадки: до кессона – при усилии прижима 6,5-7 МН, после кессона – при усилии прижима 5,4-6,2 МН;

- устойчивые зависимости наблюдаются по показателям близких к забою реферов: до кессона – на расстоянии 0-24 м от строящегося кольца, после кессона – на расстоянии 12-24 м;

- в грунтовом массиве, не нарушенном кессонными работами, в основном наблюдается увеличение осадок при увеличении усилия прижима ротора от 5,2 МН до 6,5 МН, а в нарушенном – снижение осадок при увеличении прижима от 5,8 МН до 6,7 МН.

Отсюда следует вывод, что снижение осадок на 0,8-1 мм можно добиться повышением усилия прижима ротора на 8-24 % только на нарушенной после остановки щита и кессонирования грунтовой поверхности в диапазоне удаления перед кольцом 12-24 м.

2.3. Влияние последствий кессонного пригруза на осадку поверхности. Факт увеличения зоны нарушения грунтового массива после кессонного воздействия был отнесен измерениями осадки и подъема с

Прижим и момент вращения ротора от удаления от точки кессона

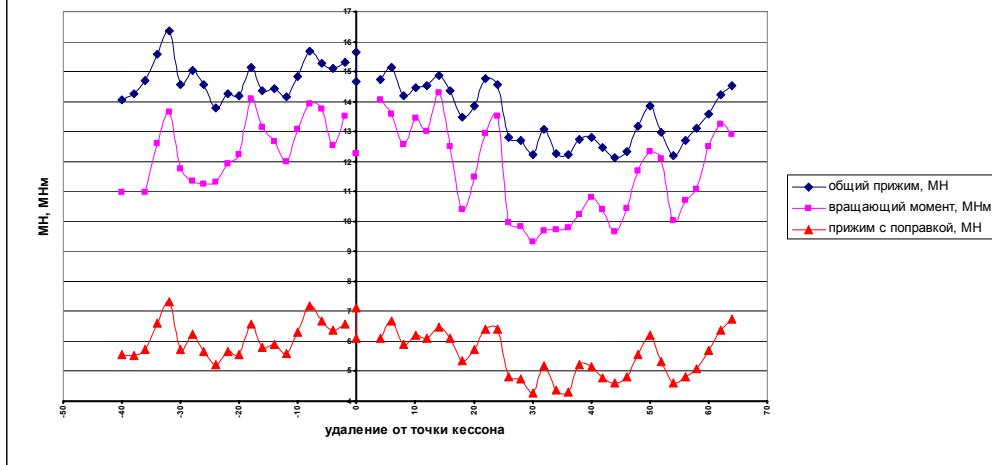


Рис. 4. График нагрузок ротора при проходке до и после кессона

Сцепление породы от прижима ротора

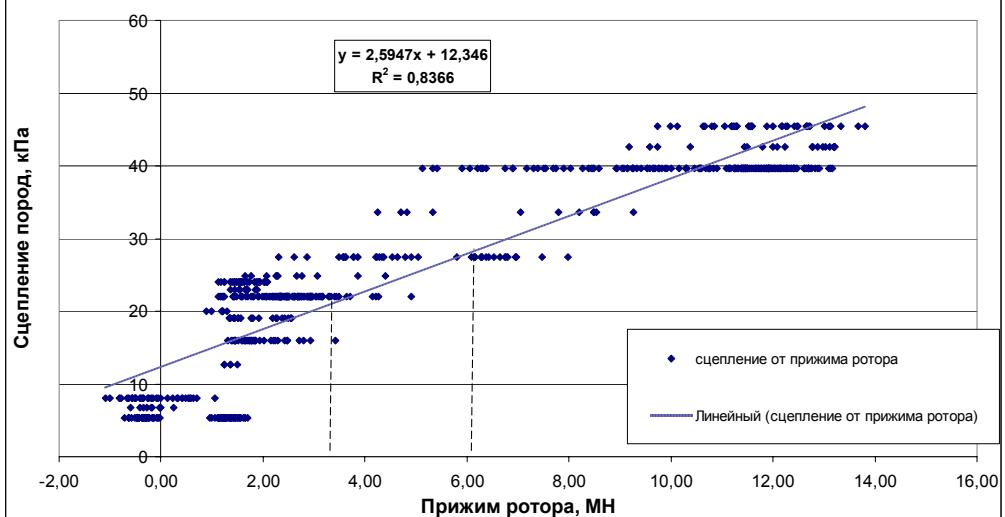


Рис. 5. Зависимость усилия прижима ротора от сцепления пород

пошаговым (каждые 2 м) приближением щита к реперам. Пространственная протяженность и величина вертикальной деформации здания по результатам всех реперов при непрерывных циклах проходки (случай 1) и

после остановки (случай 2) представляют собой полиномиальную зависимость от расстояния до щита и существенно разнятся между собой расстоянием до начала появления оса-

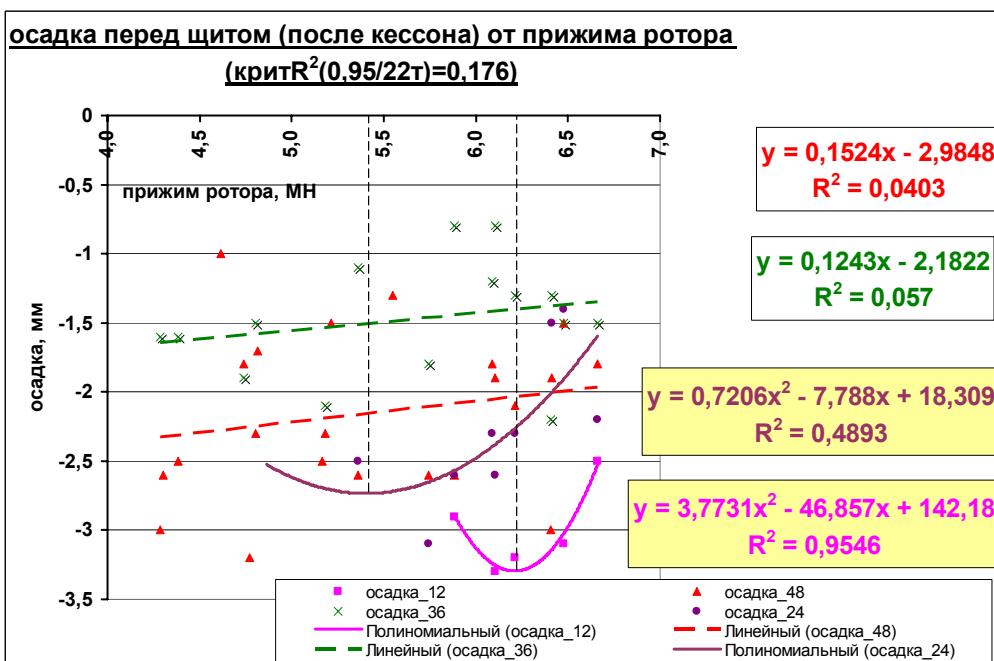
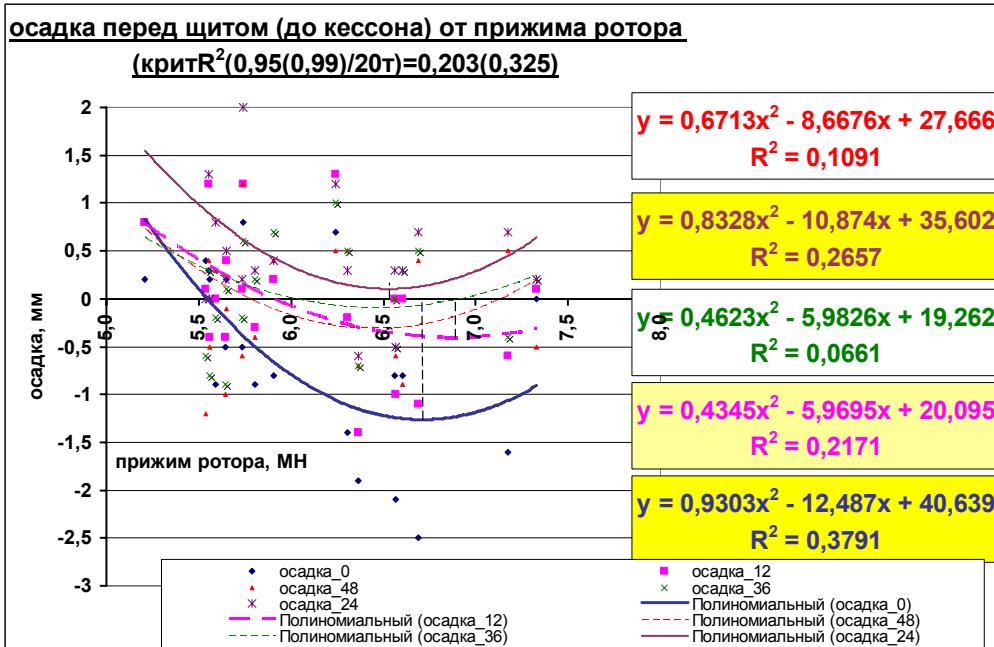


Рис. 6. Осадка перед щитом в зависимости от прижима ротора до и после кессона

дочной деформации перед забоем: 25 и 45 м (рис. 7).

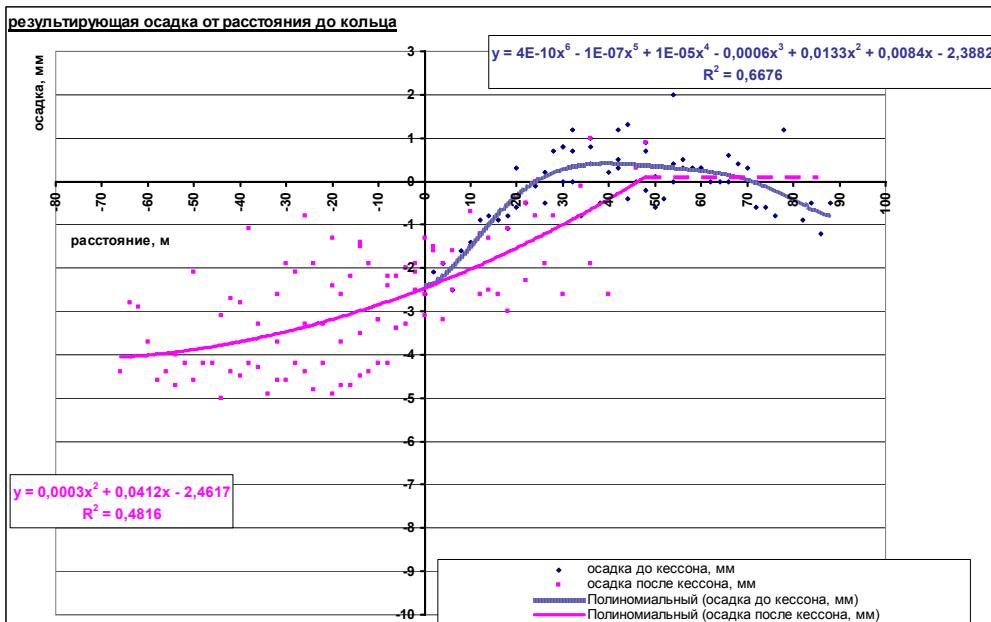


Рис. 7. Результирующая осадка впереди и за строящимся кольцом обделки

Осадка за кольцом плавно достигает 4 мм на расстоянии 60 м. Над строящимся кольцом величины результирующих осадок для 1 и 2 случая совпадают и составляют 2,5 мм. Осадки перед кольцом для 1 случая по мере удаления от щита почти линейно уменьшаются до 0, а на расстоянии 25-70 м до кольца наблюдается подъем поверхности в среднем на 0,4 мм. Осадки перед кольцом для 2 случая по мере удаления от щита почти линейно уменьшаются до 0 на расстояние 45 м, а на большем расстоянии подъем поверхности не наблюдается. По всей вероятности, это вызывается влиянием как кессонного воздействия на массив, так и динамики продвижения щита.

2.4. Направления дальнейших исследований. Вызывают научный и

практический интерес следующие направления дальнейших исследований:

- активное внедрение профильных линий реперов высокоточных наблюдательных станций вдоль трассы тоннелей;
- определение форм и величин осадки и поднятия земной поверхности перед щитом и над тоннельной обделкой;
- нахождение взаимосвязей изменений величин деформаций и динамики проходки щитом;
- построение общей деформационной математической модели, используя данные измерений на других участках тоннелей;
- разработка методики прогнозирования осадок поверхности, включающей такие факторы, как роторные и кессонные нагрузки, скорость проходки и другие показатели работы щита.

Выводы

1. Высокоточный автоматизированный теодолит – тахеометр, наблюдаемые марки-отражатели, установленные на исследуемом здании, направляющие марки-отражатели, программное обеспечение для компьютерной обработки результатов измерений позволяют со стандартным отклонением 0,3 мм измерять вертикальные деформации вдоль трассы тоннельной щитовой проходки.

2. Увеличение давления на забой путем снижения уровня бентонита в забойной камере и замещения объема в камере сжатым воздухом повышенного давления (от 1,7 до 3 бар) вызывает поднятие земной поверхности на 3-4 мм перед забоем в зоне от 0 до 36-42 м по линейной зависимости. При этом средний тангенс наклона данных прямых составляет 2,71 мм/бар.

3. Снижения осадок на 0,8-1 мм можно добиться повышением усилия прижима ротора на 8-24 % только на нарушенной после остановки щита и кессирования грунтовой поверхности в диапазоне удаления перед кольцом 12-24 м.

4. Пространственная протяженность и величина вертикальной деформации здания по результатам всех реперов при непрерывных циклах проходки (случай 1) и после остановки (случай 2) представляют собой полиномиальную зависимость от расстояния до щита и существенно различаются между собой расстоянием до начала появления деформации перед забоем: 25 и 45 м.

5. Определены пути дальнейших исследований нагрузок и деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иофис М.А., Егоров П.А. Оценка, прогноз и контроль состояния грунтового массива при строительстве тоннелей // Труды Международной научно-практической конференции «Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века: Опыт и перспективы». – М. - 28-31 октября 2002 г. – С. 499-502.

2. Инструкция по наблюдениям за сдвижениями земной поверхности и расположенным на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. РД-07-166-97. - М. - 1997. - 76 с.

3. Иофис М.А. К вопросу о прогнозе и предотвращению последствий обрушения в тоннелях // Тезисы докладов и сообщений Круглого стола «Передовые технологии, оборудование и методы инженерно-геологических и геофизических изысканий и ис-

следований при строительстве подземных сооружений». – М. - 14 марта 2007 г. – С. 37-41.

4. Бубман И.С. Геодезическо-маркшейдерское обеспечение мониторинга за наземными зданиями и сооружениями при проходке тоннелей // Труды Международной научно-практической конференции «Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века: Опыт и перспективы». – М. - 28-31 октября 2002 г. – С. 503-506.

5. Gitzow Hans-Georg, Wittke Walter. Dreidimensionale Berechnung der Zweiphasenströmung beim Tunnelvortrieb unter Druckluft / Taschenbuch für den Tunnelbau 1997.- 21. Jahrgang. -Verlag Glückauf GmbH, Essen. - 1996, S. 21-62.

Коротко об авторах

Мазеин С.В. – кандидат технических наук, сервис-инженер ООО «Херренкнехт тоннельсервис», г. Москва,
Вознесенский А.С. – доктор технических наук, профессор Московского государственного горного университета.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Л. Шкуратник.

