© Е.Ю. Куликова, 2007

УДК 69.035.4

Е.Ю. Куликова

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГОРОДСКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время практически невозможно получить данные о состоянии обделок по всей номенклатуре городских подземных сооружений. Тем не менее, необходимым материалом для анализа состояния несущих конструкций городских подземных сооружений могут служить данные для подземных сооружений транспортного назначения и тоннельных инженерных сетей, длительно и в значительном количестве используемых в любом большом городе. Поэтому в настоящем исследовании для анализа дефектов несущих конструкций подземных сооружений использовались материалы технических осмотров коммунальных и транспортных тоннелей метрополитена Москвы, данные МГУП «Мосочист-вод» и литературных источников.

Так, например, если рассматривать характер фильтрации воды *в тоннелях метрополитена*, то необходимо остановиться на следующих особенностях.

Характер и интенсивность фильтрации воды в тоннелях Метрополи-тена находится в прямой зависимости от гидростатического давления грунтовых вод. По интенсивности фильтрация воды может быть подразделена на три вида:

- сосредоточенные течи, т. е. места, где имеется заметное на глаз течение воды;
- капеж;
- сырость.

Сосредоточенные течи в тоннелях глубокого заложения наблюдаются главным образом в местах с наиболее дефектной изоляцией и защитной железобетонной рубашкой при наличии значительных сквозных швов или трещин в рубашке и, вероятно, в обделке тоннеля, а также при наличии зазоров между рубашкой и обделкой.

В тоннелях мелкого заложения сосредоточенные течи наблюдаются главным образом в температурно-осадочных швах. Причиной этого является недостаточно продуманная конструкция изоляции температурно-оса-дочных швов.

Конструкция изоляции швов следующая: снаружи шов оклеен рулонным изоляционным материалом без устройства складки (компенсатора), необходимой для воспринятая деформации; с внутренней стороны изоляции шов имеет призму, залитую битумом и законопаченную паклей. С первых же дней эксплуатации битум выжимает из шва паклю и начинает вытекать из шва. При этом создаются условия для свободного проникания воды через шов. Оклеечная изоляция вследствие температурных деформаций, вероятно, прорывается или расстраивается в стыках и отстает от обделки.

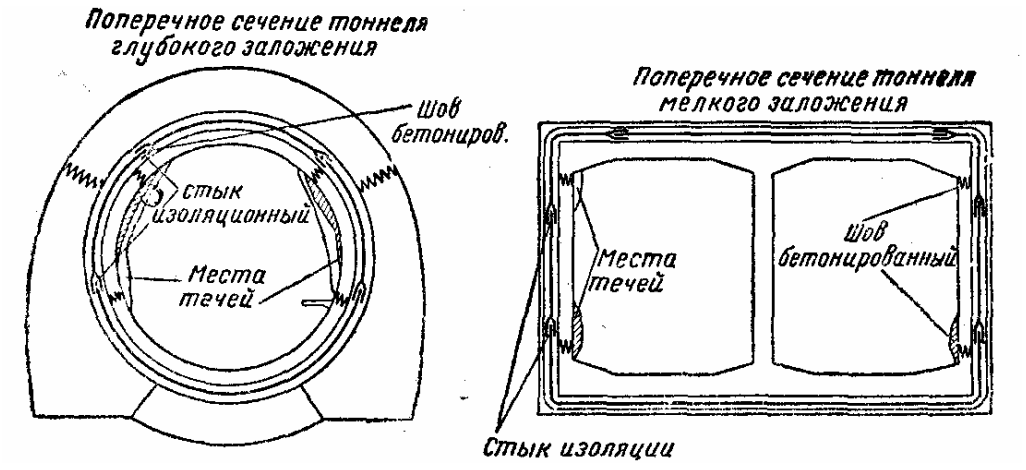

Рис. 1. Схема расположения мест фильтрации (по поперечному сечению)

По произведенным замерам дебит воды (расход), фильтрующейся в отдельных дефектных местах и тоннелях глубокого заложения, достигает 200 л/мин.

Капеж представляет собой фильтрацию воды в виде капель и в большинстве случаев наблюдается на больших площадях. В отдельных местах такая фильтрация сосредоточивается на площадях примерно 8-12 м^2 и в большинстве случаев приурочена к верхней части тоннеля – его своду.

Этот вид фильтрации проявляется обыкновенно в местах, где имеются небольшие зазоры, между железобетонной рубашкой и обделкой тоннеля и неплотный (пористый) бетон самой рубашки, но без наличия в ней сквозных трещин. Капеж появляется в местах, где гидроизоляция нарушена, а обделка имеет пористость, при которой происходит фильтрация небольшого количества воды.

Под сыростью подразумевается фильтрация воды, вызывающая намокание бетона и образование отдельных сырых пятен на его поверхности.

Некоторые проявления фильтрации имеют сезонный характер, и фильтрация воды возникает весной и осенью. Такие явления наблюдаются лишь в тоннелях мелкого заложения и указывают на зависимость фильтрации от атмосферных осадков, просачивающихся в грунт и насыщающих его водой.

Наибольшее количество мест фильтрации воды в тоннелях глубокого заложения сосредоточено на боковых частях тоннеля; в тоннелях мелкого заложения – почти на уровне лотка тоннеля и у перекрытия.

Места фильтрации, как видно из рис. 1, находятся вблизи стыка изоляции и шва бетонирования и, вероятно, происходят от неплотности шва и стыка изоляции.

В отдельных случаях на станциях фильтрация через некоторое время самопроизвольно уменьшается и исчезает. Часто после исчезновения фильтрации в одном месте она появляется по соседству, вблизи. Такое явление можно объяснить местным самоуплотнением бетона. Одной из причин самоуплотнения бетона может быть закупорка в нем пор примесями, которые содержатся в грунтовой воде. Также самоуплотнение может быть обусловлено и химическими процессами в самом бетоне под влияни-

ем химических агентов, содержащихся в грунтовой воде. При содержании в воде свободной углекислоты может происходить превращение свободного гидрата оксида кальция в карбонат кальция. Содержащиеся в воде бикарбонаты кальция и магния также могут вступать в реакцию с гидратом окиси кальция.

Образующиеся частицы карбоната кальция и магния отлагаются на стенках пор и, постепенно уменьшая их сечение, тампонируют поры в бетоне.

Влияние фильтрующей воды на бетонную обделку наиболее неблагоприятно при фильтрации в виде капежа. Такой вид фильтрации охватывает, как уже упоминалось выше, большие поверхности и даже при неагрессивной воде может привести к коррозии бетона рубашки в связи с выщелачиванием из бетона извести.

Сосредоточенные большие течи могут и не причинить большого вреда обделке, так как они омывают небольшую поверхность бетона обычно по трещинам небольшой ширины – 2-3 мм. Даже при агрессивной воде сосредоточенные течи менее вредны для бетона, чем при капеже неагрессивной воды, охватывающем большую поверхность. В таких местах в первую очередь и должны производиться работы по ликвидации фильтрации воды.

В тоннелях, как правило, в местах, имеющих сосредоточенные течи, происходит отложение красно-бурых, а местами белых натечных образований, выносимых водой. Натеки расположены большей частью на стенах или в лотке тоннелей.

Белые натеки отлагаются в виде плотной бесформенной массы или в виде сталактитов при фильтрации воды через свод или перекрытие и состоят в основном (до 65 %) из углекислого кальция. В большинстве случаев отложения белого цвета имеются на участках тоннелей, проложенных в известняках. Происхождение их можно объяснить тем, что воды имеют сильную естественную карбонизацию, и, кроме того, происходит частичное выщелачивание извести цементного раствора из-за обделки и в меньшей степени – выщелачивание бетона обделки.

Красно-бурые натеки имеют вид илистых отложений, иногда пенообразны и в основном состоят из гидрата окиси железа (до 22 %) и являются продуктом выноса грунтовой воды.

Предположение, что происходит ржавление арматуры рубашки, благодаря чему вода и насыщается железом, не основательно, так как течь, имея сосредоточенный выход, т. е. проходя через трещину в рубашке шириной в несколько миллиметров, не может дать такого большого количества выноса железа, какое имеется у некоторых течей.

Осмотром арматуры железобетонной рубашки в местах, где имеются красно-бурые отложения, установлено весьма незначительное ржавление арматуры, свободной от бетона, к тому же и сама арматура покрыта плотной пленкой этих же отложений. Арматура после 8 лет нахождения в таких условиях имеет на своей поверхности незначительные коррозионные изъявления (в виде отдельных углублений).

Наиболее важной задачей в области проектирования и строительства городских подземных сооружений является решение вопроса долговечности их обделок, который предусматривает безотказность работы сооружения в течение заданного срока эксплуатации при минимальной стоимости его возведения.

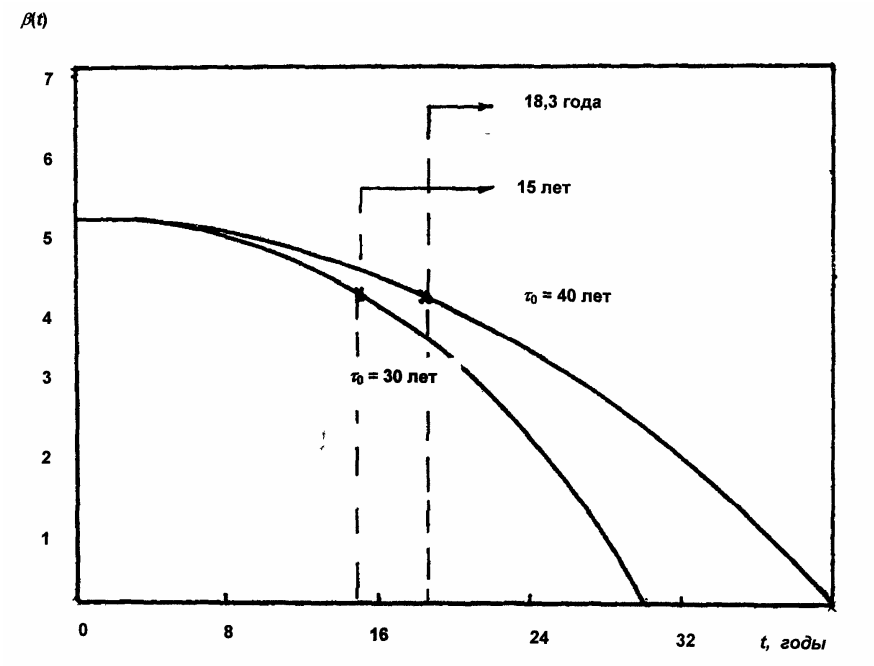

Рис. 2. Изменение надежности от времени эксплуатации подземного сооружения

Согласно исследованиям А.А. Шилина надежность несущих конструкций подземных сооружений изменяется в течение эксплуатации согласно следующей зависимости (рис. 2) [4]:

$$\beta(t) = \beta(0)\left[1 - \frac{t^3}{\tau_0^{\,3}}\right], \qquad (1)$$

где β – индекс надежности; τ_0 – время, соответствующее спаду надежности, лет; t – время эксплуатации подземного сооружения, лет.

Качество строительства, срок службы подземных сооружений и капитальные затраты, требуемые на его возведение, зависят от вида обделки и технологии ее возведения.

Исследования показывают, что, например выход обделки канализационных коллекторов из строя или частичное ее разрушение происходит под воздействием следующих факторов:

- гидроабразивное изнашивание лотковой части тоннеля;
- газовая и химическая коррозия, вызываемые агрессивностью сред, протекающим по тоннелям;
- биологическая коррозия;
- выщелачивание свободной извести из бетона под воздействием внешних грунтовых вод.

Каждый из названных факторов в отдельности или совместное действие нескольких из них приводит обделку в аварийное состояние или выводит ее из строя на долгое время. Временная зависимость роста дефектов в несущих конструкциях коллекторных тоннелей Москвы показана на рис. 3 [4].

Оценочные расчеты указывают на значительное влияние коррозии и гидроабразивного износа лотка тоннеля на несущую способность обделки коллектора.

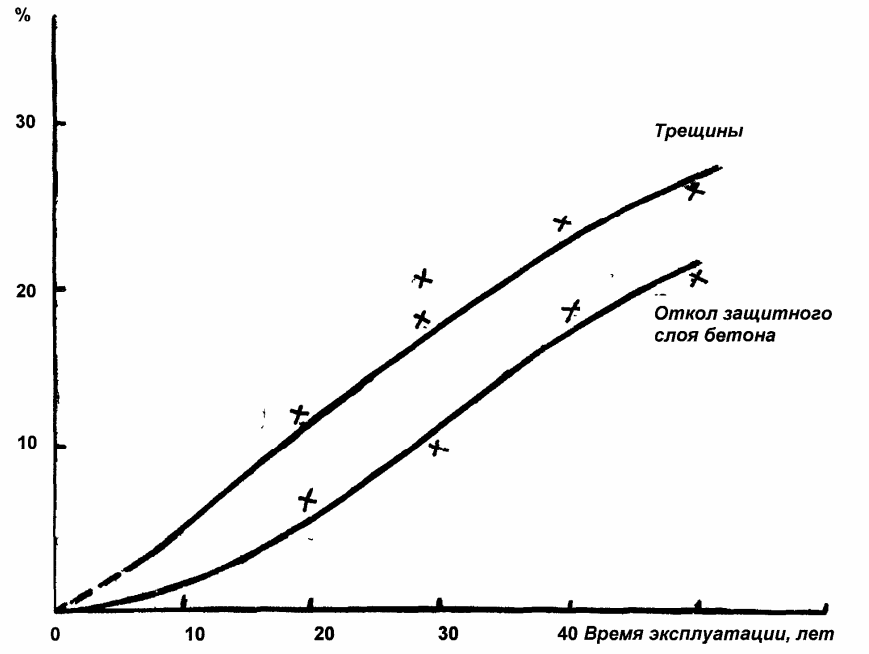

Рис. 3. Рост дефектов в конструкциях коллекторных тоннелей от времени эксплуатации

Нами получено представление о состоянии более 19751 м тоннелей метрополитена в однопутном исчислении и 56142 м коллекторных тоннелей и. Некоторые результаты и характеристики этого освидетельствования представлены в табл. 1, 2, из которых следует, что все дефекты несущих конструкций обследованных подземных сооружений можно разделить на несколько типов.

1. *Трещины* продольного, поперечного, косо-диагонального направления (относительно оси сооружения).

Для коллекторных тоннелей наиболее характерным является расположение продольных трещин в сводовой части сечения, тогда как в тоннелях метрополитена они, в основном, приурочены к месту сопряжения путевого бетона и блоков колец обделки, торцам шпал, углам дренажного лотка, местам примыкания сооружений. Длина трещин может достигать нескольких метров, их раскрытие – до 6-7 мм.

Поперечные трещины в коллекторах приурочены к технологическим швам вторичной обделки, что характерно для большинства подземных сооружений. При этом раскрытие трещин доходит до 3 см и более.

Образованию трещин, ориентированных как в продольном, так и в поперечном направлении, способствует коррозийное ослабление бетона обделок. При этом считается, что продольные трещины образуются как под воздействием внешнего горного давления, так и внутреннего гидростатического напора, действующего постоянно или кратковременно. При образовании поперечных трещин главную роль, очевидно, играют неравномерные просадки грунтов, находящихся под тоннелем и вызывающие появление изгибающих моментов. Образование трещин уве-

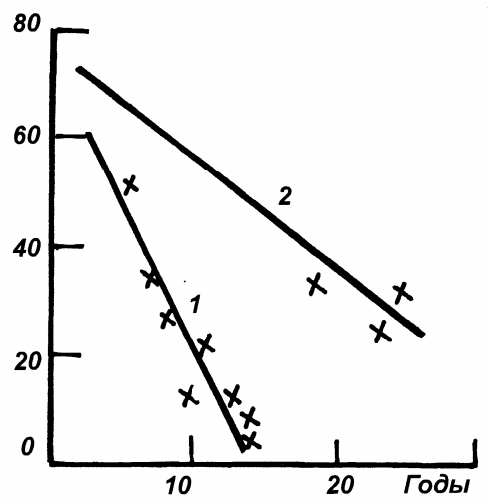

Рис. 4. Снижение образования течей через обделку подземного сооружения во времени: *1* – коллекторные тоннели Москвы, *2* – тоннели Тбилисского метрополитена

личивает водопроницаемость обделки подземного сооружения и может привести к излиянию канализационных вод на водоносный горизонт, что недопустимо с точки зрения санитарных норм.

В транспортных тоннелях эти трещины располагаются у основания дренажного лотка, в местах сопряжения смежных выработок и подземных сооружений, в путевом бетоне на уровне торцов шпал и в плоскости стыка стенового бетона. Поперечные трещины имеют ограниченную длину и раскрытие до 7 мм.

Косо-диагональные трещины приурочены к спинкам и ребрам железобетонных блоков и чугунных тюбингов и являются результатом несостыковки прочностных показателей материала обделок давлению, развиваемому домкратами проходческого щита. Аналогичное происхождение чаще всего имеют отдельные сколы стыков, углов и другие подобные дефекты.

2. *Течи*, среди которых доминируют «свищи», представляющие собой сквозные отверстия, диаметр которых колеблется от 0,5 до 5 см. «Свищи» оказывают значительное влияние на нарушение гидроизоляционных свойств обделки подземного сооружения и являются активными проводниками в него водно-песчаной смеси. Так, при эксплуатации коммунальных подземных сооружений через «свищи» в среднем в месяц намывается до 5-10 кг песка на 1 м тоннеля, что приводит к образованию крупных полостей за обделкой, величина которых может достигать более 3-7 м^3.

«Свищи» оказывают значительное влияние на снижение фильтрационной надежности обделки канализационных тоннелей. В целом не создавая аварийной обстановки, они являются причиной утечки фекальных масс в окружающий массив и, с другой стороны, проводником в тоннель песка, который является мощным агентом истирания. Наиболее уязвимым местом обделок и местом образования эксплуатационных «свищей» являются места расположения технологических швов

Подобное же явление отмечается в тоннелях метрополитена. Так, согласно [64], наличие «свищей» на отрезке тоннеля метрополитена 10 м привело к выносу в него водно-песчаной смеси, объем которой нарастал от кубических сантиметров в сутки в начале эксплуатации тоннеля до нескольких кубометров через полгода его работы.

Анализ показывает, что от 60 до 90 % «свищей» приурочено к местам расположения технологических швов.

Исследование течей позволило выявить закономерность их развития во

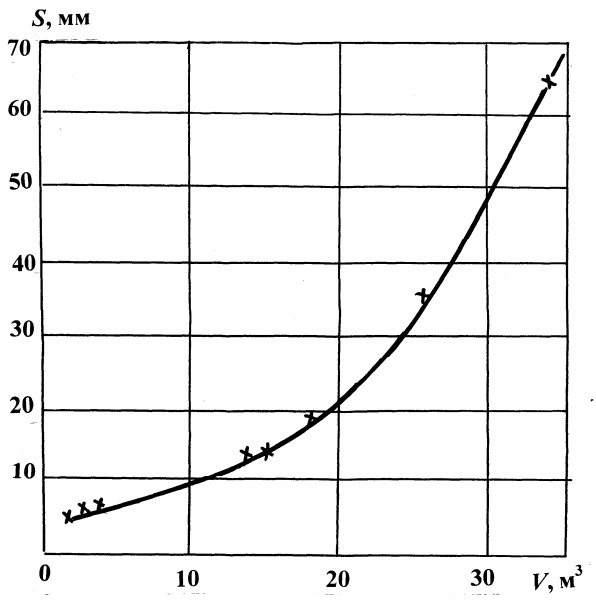

Рис. 5. Зависимость просадки тоннеля S от количества вымытого песка V

времени. На рис. 4 приводятся результаты обработки данных о воз-никновении течей в течение ряда лет в тоннелях Тбилисского Метрополи-тена (кривая 1) и в коллекторных тоннелях Москвы (кривая 2). Полученные зависимости свидетельствуют, что образование течей в обделках подземных сооружений со временем уменьшается, несмотря на то, что предыдущие течи тщательно заделывались и не могли служить «разгрузочными отверстиями» для напоров и потоков подземных вод.

Подводя итог, отметим, что фильтрация грунтовых вод в подземное сооружение происходит по кольцевым стыкам блоков или тюбингов, по продольным стыкам и по отдельным течам – «свищам». Около 40-50 % притоков в подземное сооружение поступает через разуплотненные стыки между блоками (тюбингами), более 50 % – через «свищи». Через трещины выносится более 60 % несвязного грунта, через «свищи» – около 40 %. Наряду с течами через «свищи» имеет место слабая фильтрация воды через тело блоков, проявляющаяся в виде мокрых пятен.

3. *Просадка лотка подземного сооружения*. Осадка лотка, в основном, происходит в местах выноса грунта. Образование полостей под лотком подземного сооружения нарушает статический режим работы обделки и приводит к осадке.

На рис. 5 приводится зависимость просадки тоннеля метрополитена от объема вынутого грунта, полученная автором на основании анализа материалов освидетельствования обделок тоннелей. Как следует из графика, величина осадки возрастает параболически во времени, что ведет к нарастающему растрескиванию лотковой части тоннеля.

4. *Эллиптичность*, наблюдаемая у кольцевых железобетонных или чугунных обделок. В соответствии со СНиП III-44-77 «Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены» (с изм. 1981 г.) максимальное отклонение диаметров тоннельной обделки от проектных не должно превышать ±50 мм, однако на практике отклонения значительнее [1], [2], [4]. Наряду с эллиптичностью колец может наблюдаться их смещение, достигающее 70-80 мм.

5. Коллекторные тоннели подвержены *размыву лотка*, связанному с истирающим действием твердых включений, характерных для масс, протекающих по тоннелю. Действие абразивов усугубляется наличием «свищей», трещин и химического воздействия, что ведет к ос-

лаблению материала и конструкции лотка.

6. *Вывалы отдельных кусков бетона* из сводной части обделок подземных сооружений.

Таким образом, несмотря на высокие требования к проектированию и производству работ при подземном строительстве несущие конструкции подземных сооружений обладают рядом существенных дефектов, в непродолжительное время приводящих к выходу объектов из строя и дорогостоящим ремонтам, составляющим от 25 до 100 % от стоимости строительства подземного сооружения.

Вскрытие механизма образования дефектов обделок позволяет разработать мероприятия по предотвращению их образования, удешевлению эксплуатации и строительства подземных сооружений в городе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куликов Ю.Н.* Повышение надежности и долговечности коллекторных тоннелей //В сб. научн. тр. «Строительство подземных сооружений». – М.: МГИ, 1984.
2. *Нгуен Суань Мань.* Разработка технологии возведения монолитных бетонных обделок гидротехнических тоннелей, обеспечивающих их долговечность. – Автореферат на соиск. уч. степени к.т.н. – М.: МГИ, 1991.
3. *Шилин А.А.* Обоснование стратегии эксплуатации и разработка конформативных технологий ремонта конструкций подземных сооружений. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГГУ, 2002.
4. *Ярославцев Ю.П.* Разработка технологии возведения вторичных обделок коллекторных тоннелей, обеспечивающей повышение срока их службы. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГИ, 1985.

Коротко об авторах

Куликова Елена Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт», Московский государственный горный университет.

Р У К О П И С И ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Лепетюхин Д.В.* Критерии качества функционирования угольных шахт в конкурентной среде (555/03-07 — 01.12.06) 4 с.
2. *Кузьмин А.А.* Снижение экологического ущерба от техногенных аварий на нефтепроводе (556/03-07 — 08.12.06) 5 с.