Мир
горной книги

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель	
Л.А. ПУЧКОВ	*президент МГГУ, чл.-корр. РАН*
Зам. председателя	
Л.Х. ГИТИС	*директор Издательства МГГУ*
Члены редсовета	
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ	*академик РАЕН*
А.П. ДМИТРИЕВ	*академик РАЕН*
Б.А. КАРТОЗИЯ	*академик РАЕН*
М.В. КУРЛЕНЯ	*академик РАН*
В.И. ОСИПОВ	*академик РАН*
Э.М. СОКОЛОВ	*академик МАН ВШ*
К.Н. ТРУБЕЦКОЙ	*академик РАН*
В.В. ХРОНИН	*профессор*
В.А. ЧАНТУРИЯ	*академик РАН*
Е.И. ШЕМЯКИН	*академик РАН*

Е.Ю. КУЛИКОВА

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ГОРОДСКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ПОДЗЕМНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР ГОРНОЙ КНИГИ»
2007

УДК 624.191.9
ББК 38.78
К 90

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.

Куликова Е.Ю.

К 90 Фильтрационная надежность конструкций городских подземных сооружений. — М.: Издательство «Мир горной книги», 2007. — 316 с.: ил.

ISBN 978-5-91003-017-0 (в пер.)

Дан анализ характера и причин образования дефектов в несущих конструкциях городских подземных сооружений. Приведены результаты исследований фильтрационной надежности существующих сборных и монолитных обделок подземных сооружений и сделан вывод об их несоответствии устанавливаемым в нормативных документах требованиям. Среди факторов, влияющих на снижение водонепроницаемости несущих конструкций подземных сооружений, выделены наиболее значимые: термовлажностные режимы внутри подземного сооружения, материал технологических швов, плотность пород, вмещающих данные объекты. Приведен топографический план развертки участка бетонной обделки для ряда тоннелей, который позволил обнаружить закономерности распределения прочностных и фильтрационных показателей вторичной бетонной обделки. Детально рассмотрены технологические аспекты достижения заданной степени плотности вмещающих подземное сооружение пород при применении их химического укрепления.

Для специалистов, работающих в области освоения подземного пространства городов, занятых вопросами обеспечения необходимой водонепроницаемости, надежности и долговечности конструкций подземных сооружений. Может быть полезна студентам горных вузов и факультетов.

УДК 624.191.9
ББК 38.78

ISBN 978-5-91003-017-0

© Е.Ю. Куликова, 2007
© Издательство «Мир горной книги», 2007
© Дизайн книги. Издательство МГТУ, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Освоение подземного пространства крупных городов приобретает огромное значение из-за дефицита городских территорий, постоянного роста населения, резкого увеличения загазованности, транспортных потоков и недостаточного развития городской инфраструктуры.

Почти во всех крупных городах мира идет процесс активного освоения подземного пространства для размещения транспортных и инженерных систем, объектов торговли и бытового обслуживания, складов и автостоянок, многофункциональных подземных комплексов. Общий объем проведения только подземных коммуникаций в РФ составляет порядка 200 — 250 км/год, из которых не менее 75 — 80 км/год приходится на Москву.

Образуется новая подземная инфраструктура мегаполисов, которая требует корректного учета влияния техногенных процессов на экологию подземного пространства, на состояние гидрогеологической среды, а также архитектурно-художественное оформление сооружаемых функциональных подземных центров и объектов.

При освоении подземного пространства используются практически все направления современного подземного строительства. Комплексное освоение подземного пространства является одним из наиболее эффективных путей решения территориальных, транспортных и экологических проблем крупных городов, развивающихся как культурно-исторические и торгово-промышленные центры. При этом наиболее полно сохраняется окружающая среда для размещения парков и рекреационных зон и значительно уменьшается загрязнение от автомобильного движения.

Одним из факторов, тормозящих широкое освоение подземного пространства городов, является недостаточная надежность несущих конструкций подземных сооружений. Несмотря на большие достижения в проектировании и технологии строительства этих объектов, последние не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям долговечности.

Так, по различным оценкам от 60 до 80 % инженерных коммуникаций городов и поселков городского типа на территории СНГ отслужили нормативный срок, порядка 25 — 30 % из этого числа находится в аварийном состоянии. Если рассматривать только подземные инженерные коммуникации России, то их общая протяженность в настоящее время составляет 373,5 тыс. км (на долю канализации приходится порядка 115,2 тыс. км). Из них отслужили нормативный срок и требуют замены 109,7 тыс. км.

Протечки из коммуникаций загрязняют подземное пространство населенных пунктов. По оценке специалистов, на территории Российской Федерации подтоплено 809 городов и 478 поселков городского типа, причем весьма значимой составляющей этого процесса являются утечки из канализационных и водопроводных коммуникаций. Только замена более 1500 км коммуникаций в год в течение 10 лет может способствовать улучшению сложившегося положения.

Появление дефектов в обделках снижает срок службы подземных сооружений от 4 до 20 лет и требует дополнительных капиталовложений. Значительная часть финансовых средств уходит на борьбу с отказами, среди которых основное место занимают нарушения гидроизоляционных свойств несущих конструкций подземных объектов. Например, на ликвидацию течей, устройство дренажей и подобные мероприятия на метрополитене в среднем затрачивается для перегонных тоннелей 0,005 %, станционных — 0,018 % на единицу стоимости основных фондов, что в конечном итоге составляет значительную сумму. Ремонты коммунальных тоннелей, обусловленные необходимостью ликвидации нарушений плотности и размыва обделки, составляют 2 — 30 % стоимости строительства каждого кубометра сооружения на один год эксплуатации.

Размеры инвестиций в поддержание подземных сооружений в процессе их эксплуатации в развитых странах доходят до 50 % общей величины вложений в строительство. Затраты только на ремонт железобетона, из которого выполнено большинство промышленных сооружений, составляют 4 — 5 % валового продукта развитых стран мира.

В 2004 г. уровень аварийных фондов тоннелей инженерных коммуникаций в Москве составлял 28 %. В других городах России эта величина еще больше и доходит до 40 % и более. Недовложение средств и неправомерное их расходование на объектах, которые не нуждаются сегодня в ремонтных работах, приводят к росту аварийного фонда примерно до 1% в год.

Свыше 90 % всех подземных сооружений в городах выходят из строя ранее проектных сроков, то есть не соответствуют проектному уровню долговечности [120]. Преждевременный износ приводит к их отказу и необходимости выполнения ремонтных работ. Однако конструкции подземных сооружений отличаются плохой ремонтопригодностью. Их трудно и дорого ремонтировать, чаще всего невозможно вскрыть. Таким образом, можно утверждать, что сегодня показатели надежности конструкций подземных сооружений находятся на низком уровне.

Заложенная еще на стадии проектирования недостаточная фильтрационная надежность несущих конструкций городских подземных сооружений связана с нерешенностью ряда вопросов их фильтрационного взаимодействия с массивом вмещающих пород.

Водопритоки через обделку подземного сооружения разрушают несущие конструкции и создают неприемлемые микроклиматические условия для пребывания человека. Возникает вопрос не только о допустимой степени проницаемости этих конструкций, о влиянии процессов фильтрации на свойства материалов обделки и их устойчивость, но и о связи водопроницаемости несущих элементов со свойствами массива горных пород. Поэтому обеспечение фильтрационной надежности городского подземного сооружения должно основываться на комплексе защитных мер, направленных на вовлечение в работу как соответствующих свойств самого подземного объекта, так и породного массива и технологических приемов его строительства, поддержания и эксплуатации. Следовательно, надежность любого объекта подземного строительства подразумевает надежность системы «массив горных пород — подземное сооружение» в комплексе, а не по отдельным ее элементам.

Надежность подземных сооружений нельзя рассматривать в отрыве от массива вмещающих пород и тех процессов, которые происходят как в подземном пространстве, так и на земной поверх-

ности в результате ведения подземных и градостроительных работ. Массив горных пород воспринимает нагрузки и другие воздействия от надземных частей зданий, является проводником тепломассообменных и других процессов к подземному сооружению.

При отсутствии обеспеченной надежности или устойчивости массива горных пород вся система становится также ненадежной. Более того, ненадежность вмещающих горных пород вызывает, как правило, появление таких деформаций и напряжений в конструкциях подземного объекта, при которых они становятся ненадежными даже в тех случаях, если их надежность сама по себе (без учета влияния массива горных пород) и была обеспечена.

В то же время отсутствие достаточной технологической надежности и надежности несущих элементов подземного сооружения вызывает нарушение равновесно-напряженного состояния вмещающего массива и активизацию нежелательных естественных процессов в породах. Поэтому фильтрационная надежность подземных сооружений не может существовать сама по себе, а должна быть четко увязана с технологической надежностью и надежностью строительных конструкций городского подземного объекта.

В связи с этим в общей проблеме освоения подземного пространства возникает актуальная задача, заключающаяся в следующем:

- определение допустимой степени проницаемости несущих конструкций подземных сооружений, обусловленной санитарно-гигиеническими условиями пребывания людей в подземных помещениях;
- установление характера взаимодействия несущих конструкций со свойствами грунтового массива, вмещающего данный объект;
- изыскание возможностей управления фильтрационными свойствами массива с использованием наиболее приемлемых средств его упрочнения.

В настоящее время номенклатура и срок службы действующих городских подземных объектов невелики, поэтому в данной работе круг их рассмотрения ограничен сооружениями транспортного назначения и тоннельных канализационных сетей, длительно и в большом количестве используемых в любом крупном городе.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ГЛАВА 1

1.1 НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРОДСКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Интенсивный рост крупных городов, характерный для современного города, сопровождается расширением границ городских территорий, вызывающих сокращение земель, пригодных для народнохозяйственного освоения. Селитебные земли в больших городах увеличиваются каждые 5 лет на 20 %. Возникновение опасности частичного, а в некоторых случаях и полного уничтожения естественного ландшафта, резкое ухудшение санитарно-гигиенического состояния городов, рост стоимости урбанизированных территорий, ущерб, наносимый окружающей природной среде и всему живому (и прежде всего человеку) со всей очевидностью ставят проблему использования подземного пространства городов.

Мировая практика уже доказала техническую возможность, экономическую целесообразность и экологическую надежность использования подземного пространства больших городов. Анализ литературных, производственных и проектных данных [7, 15, 32, 37, 80, 82, 91] позволяет выявить позитивные эффекты от комплексного освоения подземного пространства городов (рис. 1.1): рационально размещать здания, сооружения, транспортные и инженерные коммуникации, резко уменьшать сокращение сельскохозяйственных угодий, экономить материалы, улучшать состояние окружающей среды.

Вертикальное и горизонтальное размещение сооружений в подземном пространстве определяется характером района или микрорайона города, возможным способом строительства сооружения, его конструктивными особенностями и, следовательно, уровнем строительной техники, особенностями перспективной застройки местности, экономическими и другими аспектами.

Подземные сооружения находятся в тесном взаимодействии с надземными частями зданий и сооружений через ряд общих са-

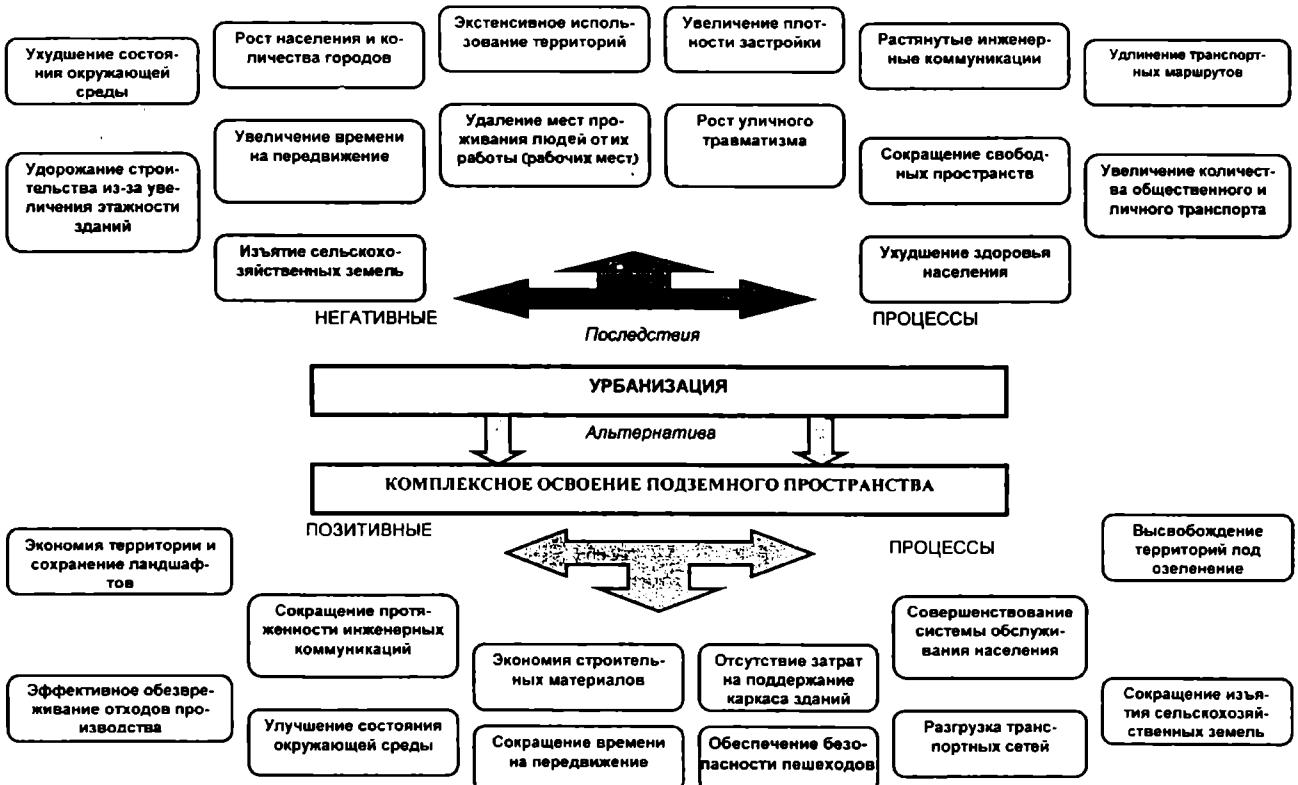

Рис 1.1. Позитивные эффекты от комплексного освоения подземного пространства городов

нитарно-гигиенических, инженерно-строительных, архитектурных и других условий и требований, предопределяющих оптимальные для конкретных ситуаций планировочные и инженерно-технические решения. В увязке с вышеозначенными факторами решается вопрос о номенклатуре подземных сооружений города, которая в настоящее время охватывает значительный диапазон муниципальных и производственных нужд городов и требует их классификации.

Существует ряд классификаций объектов, размещаемых в подземном пространстве городов [15, 37, 82, 91]. В большинстве из них подземные сооружения подразделяются в зависимости от их назначения и характера использования. В табл. 1.1 приведена подобная классификация, составленная согласно анализу литературных данных и наиболее полно отражающая номенклатуру объектов, размещаемых в подземном пространстве. Данная классификация обладает достаточно существенным недостатком, разделяя подземные сооружения по группам без учета целого ряда признаков и связей, как, например, функциональные и композиционные взаимосвязи с другими объектами, длительность пребывания людей в подземных помещениях, характер проявления социально-экономического эффекта от освоения подземного пространства и др.

Наиболее полная классификация городских подземных сооружений предложена доктором архитектуры Г.Е. Голубевым [15], в которой наряду с делением подземных сооружений по назначению приводится деление по объемно-планировочной схеме, месту и характеру расположения в городе, количеству подземных ярусов, однако целый ряд признаков и здесь не принят во внимание.

Классификация, разработанная Е.В. Петренко [82], охватывает в основном подземные сооружения, размещенные в отработанных горных выработках, что не является характерным явлением для городов.

Классификации А.А. Сегединова [91], Я. Келемена и З. Вайды [37] также делят подземные сооружения в основном по назначению.

Таблица 1.1

№ п/п	Назначение	Форма выработок	Наиболее характерные вмещающие породы	Обделка	Способ вскрытия	Средняя глубина заложения, м
1	Торговля	Большого сечения с подходными тоннелями	Устойчивые скальные массивы, сланцы, супеси, суглинки	Монолитный и сборный железобетон	Открытый, комбайновая проходка, БВР	До 10—15
2	Общественное питание	Камеры, выработки большого сечения	Устойчивые скальные массивы, сланцы, супеси, суглинки	То же	То же	До 10—15
3	Зрелищные	Тоннели, камеры большого сечения	Устойчивые скальные массивы, породы средней крепости, известняки, доломиты, гранитогнейсы, $f = 6 \div 15$	Монолитный и сборный железобетон, набрызгбетон, комбинированные	БВР, сплошным забоем, уступами	До 10—15
4	Спортивные	Выработки большого сечения	Устойчивые скальные массивы, породы средней крепости, $f = 6 \div 15$	То же	То же	До 10—15
5	Предприятия связи	Камеры, выработки арочной и прямоугольной формы	Глины, сланцы, слабые грунты, водоносные породы	Монолитный и сборный железобетон	Штольни, подходные тоннели и т.п.	До 10—15
6	Предприятия туризма	Камеры, протяженные выработки тоннельного типа	Прочные и слабые породы, суглинки, супеси	Монолитный и сборный железобетон, набрызгбетон, анкеры	Открытый, «стена в грунте», замораживание	До 20

7	Объекты сельского хозяйства	Различные выработки шахт, рудников	Известняки, сланцы, соляные пласты, уголь	Незакрепленные, дерево, набрызгбетон	Стволы, штольни, БВР	По глубине отработки полезного ископаемого
8	Библиотеки, архивы, административные здания	Камеры-блоки	Соль, известняк, руда	Монолитный железобетон	Вертикальные и наклонные стволы	То же
9	Энергетические объекты	Камеры, горизонтальные, вертикальные, наклонные выработки различной формы	Устойчивые скальные массивы, породы средней крепости, известняки, доломиты, гранитогнейсы, $f = 6 \div 15$	Монолитный и сборный железобетон, набрызгбетон, комбинированные	Сплошными и уступными забоями	То же
10	Инженерные сети	Тоннели круглой и прямоугольной формы	Пески, супеси, моренные и тяжелые глины, мергели, сланцы, слабые известняки, $f = 0{,}5 \div 2$	Сборные бетонные и железобетонные блоки, тюбинги, кольца, керамические блоки, пресс-бетон, цельносекционные обделки	Щитовой или открытый способы работ	5 — 15
11	Тоннели многофункционального назначения	То же	То же	То же	БВР, открытый, щитовой способы	5 — 15
12	Сооружения гражданской обороны	Камеры, блоки камер	Пески, песчаники, супеси, суглинки, известняки, гнейсы	Монолитный железобетон	Открытые способы	5 — 20

Продолжение табл. 1.1

№ п/п	Назначение	Форма выработок	Наиболее характерные вмещающие породы	Обделка	Способ вскрытия	Средняя глубина заложения, м
13	Технические емкости	Камеры, емкости галерейного типа, форма эллипсоида, шара	Соляные отложения	Незакрепленные	Размыв	400 — 800
14	НИИ и учебные заведения	Многоуровневые шахты	Известняки, песчаники	Железобетон + стальной прокат, монолитный бетон, торкрет	Проходка шахт из верхней зоны	10 — 150
15	Части жилых зданий	Подвалы прямоугольной или сводчатой формы	Культурный слой, наносные грунты, пески, супеси, суглинки	Монолитный и сборный железобетон	Открытые способы	10 — 20
16	Мусоросборные и вспомогательные	То же	То же	То же	То же	До 10
17	Гидротехнические	Тоннели кругового или некругового очертания	Слаботрещиноватые скальные породы, $f = 2 + 8$	Незакрепленные, набрызгбетон, железобетон, двухслойные обделки из железобетона с внутренней железоторкретной оболочкой, комбинированные	БВР, уступный способ, сплошным забоем	10 — 30
18	Подземные тюрьмы	Камеры, протяженные выработки	Устойчивые породы, крепкие, средней крепости	Бетон, набрызгбетон, штучные материалы	БВР, открытые способы	5 — 30

19	Трансляционные сети	Протяженные выработки	Устойчивые породы, суглинки, супеси, глины и т.п.	Сборный и монолитный железобетон	Открытые способы	5 — 10
20	Культовые	Камеры соответствующей формы, подходные выработки	Устойчивые, крепкие, средней крепости	Незакрепленные	БВР, открытый способ	5 — 10
21	Инженерно-транспортные	Тоннели кругового, подковообразного, прямоугольного очертания, станции, камеры	Устойчивые крепкие и средней крепости, пески, супеси, суглинки, глины, обводненные породы	Чугунные тюбинги, сборный и монолитный железобетон, др.	Наклонные и вертикальные стволы, открытый способ, БВР, «стена в грунте», щитовая проходка, комбинированный способ	7 — 50
22	Склады	Камеры, выработки околоствольных дворов арочного сечения, тоннели	Плотные гнейсы, граниты, известняки, ракушечники, сланцы, скальные, соляные отложения	Незакрепленные, набрызгбетон (10 — 15 см), монолитный бетон, железобетон, анкеры, металл	Штольневая, метод камуфлетных зарядов, горный способ	7 — 100
23	Коммунально-бытовые	Камеры, блоки камер	Устойчивые крепкие и средней крепости, глины, суглинки	Монолитный бетон и железобетон	БВР, открытые способы	5 — 50
24	Медицинские	Камеры, естественные и искусственные пещеры	Соль, калийные отложения, серебросвинцовая руда	Незакрепленные	Размыв	5 — 50
25	Промышленные	Камеры, тоннели	Гипс, каменная соль, плотный известняк, песчаник, породы пологого заложения, устойчивые	Облегченные в виде металлических арок с защитным каркасом и сеткой, анкерная крепь + набрызгбетон	Штольневая	Не менее 60

На наш взгляд, особое внимание при классификации подземных сооружений города следует обратить на санитарно-гигиенические требования, во многом ограничивающие степень использования подземного пространства.

Анализ существующих классификаций городских подземных сооружений, а также их возможных определяющих признаков деления позволяет составить классификацию, включающую достоинства имеющихся и одновременно учитывающую ряд признаков, расширяющих ее диапазон.

Вид и структура такой классификации могут быть представлены следующим образом.

I группа: общегородские и архитектурно-планировочные решения. Эта группа включает деление на классы по принципам:

- зонирование;
- характер размещения объектов в городе;
- объемно-планировочные схемы;
- в зависимости от функциональной и композиционной взаимосвязи с другими зданиями и сооружениями.

II группа: по назначению. Деление на классы в этом случае соответствует данным табл. 1.1.

III группа: по характеру проявления социально-экономического эффекта от комплексного освоения городского подземного пространства. В этой группе можно выделить три класса:

- транспортные сооружения и коммуникации;
- предприятия торговли, общественного питания, зрелищные и некоторые учреждения коммунально-бытового обслуживания;
- объекты складского и коммунального хозяйства, промышленные сооружения, сооружения обслуживания и хранения всех видов транспортных средств, объекты инженерного оборудования.

IV группа: по уровню надежности городских подземных сооружений. Эта группа подразумевает следующие принципы деления городских подземных сооружений:

- уровень экологической надежности;
- надежность несущих конструкций;
- технологическая надежность.

Деление городских подземных сооружений по уровню экологической надежности составляет основу для выработки эффективных решений инженерного обеспечения экологической безопасности городов.

Экологическая надежность предполагает исключение вредного влияния городских подземных сооружений:

- на состояние вмещающего породного массива, подземных вод, естественных процессов в районе заложения и прилегающих к подземному сооружению районах;
- на здоровье обслуживающего объект персонала и посетителей.

В последнем случае охрана здоровья людей чаще всего регламентируется временем пребывания людей в подземном сооружении. В зависимости от этого сооружения подразделяются на следующие типы:

- объекты кратковременного пребывания (от нескольких минут до 1 ч);
- объекты со средней продолжительностью пребывания (1,5 — 3 ч);
- объекты длительного пребывания (более 3 ч).

Важнейшими параметрами, определяющими время пребывания человека в подземном сооружении, являются температурно-влажностные: допустимая и оптимальная температуры ($T_{доп}$, $T_{опт}$), относительные влажности ($W_{доп}^{отн}$, $W_{опт}^{отн}$), скорости движения воздуха ($V_{доп}$, $V_{опт}$). В зависимости от этих параметров можно выделить еще одну классификационную группу.

V группа: по температурно-влажностным условиям внутри подземного сооружения, которые, с одной стороны, определяются требованиями технологии осуществляемого процесса, а с другой — условиями комфорта для людей.

В соответствии с этими требованиями все городские подземные сооружения можно подразделить на следующие типы:

- для выполнения легких физических работ: зрелищные, медицинские, административные, культовые, объекты связи, библиотеки и т.п.;

• для выполнения работ средней тяжести: предприятия торговли, общественного питания, коммунально-бытового обслуживания, инженерно-транспортные и т.п.;

• для выполнения тяжелых работ: объекты промышленности, энергетические и гидротехнические службы и т.п.;

• склады и холодильники; выделены в отдельную группу из-за необходимости поддержания практически одинаковой температуры и влажности в течение всего года.

Требования к температурно-влажностным условиям каждой из четырех описанных категорий приведены в табл. 1.2, составленной на основании соответствующих СНиПов и ГОСТов. Данные табл. 1.2 могут служить исходными для оценки степени водонепроницаемости городских подземных сооружений.

Соблюдение этих требований, особенно заданной влажности в подземных помещениях, может быть обеспечено в значительной степени за счет герметизации сооружения — высокой водонепроницаемости его несущих конструкций. Вместе с тем безотказность работы несущих конструкций городских подземных сооружений обязательно предполагает их устойчивость, а также оптимальный характер взаимодействия с массивом вмещающих пород.

Проблемам устойчивости конструкций подземных сооружений посвящено значительное количество работ [40, 58, 101],

Таблица 1.2

Категория сооружения	Период года	Требования					
		$T_{опт}$, °С	$T_{доп}$, °С	$W_{опт}^{отн}$, %	$W_{доп}^{отн}$, %	$V_{опт}$, м/с	$V_{доп}$, м/с
I	Холодный Теплый	21÷24 22÷25	17÷22 19÷28	40÷60 40÷60	75 55÷60	0,1 0,1÷0,2	0,1÷0,2 0,1÷0,3
II	Холодный Теплый	17÷23 20÷23	13÷23 15÷27	40÷60 40÷60	75 65÷70	0,2 0,3	0,3÷0,4 0,2÷0,5
III	Холодный Теплый	16÷18 18÷20	12÷19 13÷26	40÷60 40÷60	75 75	0,3 0,4	0,5 0,2÷0,6
IV	Весь период	−1÷0	—	—	85÷90	—	—

в которых с достаточной степенью достоверности решены сложные задачи механики подземных сооружений и расчета крепей и обделок. Однако вопрос водонепроницаемости как важнейший аспект службы несущих конструкций не получил достаточного развития. Тем не менее значительные водопритоки через обделку подземного сооружения, разрушающие его конструкции и создающие неприемлемые микроклиматические условия для пребывания человека, превращает этот вопрос в проблему огромной значимости.

Проблема водонепроницаемости несущих конструкций капитальных выработок и особенно городских подземных сооружений требует решения ряда важных вопросов:

- о допустимой степени проницаемости этих конструкций, обусловленной санитарно-гигиеническими условиями пребывания людей в городском подземном сооружении;
- о влиянии процессов фильтрации на свойства материалов несущих конструкций и их устойчивость;
- о связи водонепроницаемости конструкций со свойствами вмещающего породного массива и т.п.

Анализ литературных источников [67, 107] показывает, что влияние процессов фильтрации на свойства материалов несущих конструкций (прежде всего бетона) рассмотрено достаточно глубоко, тогда как по упомянутым выше первому и третьему вопросам четких представлений нет, что ведет к недоучету их при проектировании и строительстве. Таким образом, объяснение явления нарушенности несущих конструкций подземных сооружений, нередко приводящего к осложнениям при эксплуатации этих объектов и удорожанию их стоимости за счет ремонта, требует анализа дефектов действующих подземных сооружений.

1.2. ДЕФЕКТЫ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГОРОДСКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время практически невозможно получить данные о состоянии обделок по всей номенклатуре городских подземных сооружений, приведенных в табл. 1.1, в связи с их не-

значительным количеством и малым сроком службы. 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 для анализа дефектов несущих конструкций подземных сооружений использовались материалы технических осмотров коммунальных и транспортных тоннелей метрополитена Москвы [74 — 76], данные МГУП «Мосочиствод» и литературных источников [44, 59, 64, 70, 73, 102, 106, 114, 115, 121, 124].

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

Характер и интенсивность фильтрации воды в тоннелях метрополитена находятся 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-осадочных швов.

Конструкция изоляции швов следующая: снаружи шов оклеен рулонным изоляционным материалом без устройства складки (компенсатора), необходимой для восприятия 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.

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, преимущественно наблюдается на значительных площадях. В отдельных местах такая фильтрация сосредоточивается на площадях примерно 8 — 12 $м^2$ и в основном 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.

Очаги фильтрации, как видно из рис. 1.2, находятся вблизи стыка изоляции и шва бетонирования и, вероятно, образуются от неплотности шва и стыка изоляции.

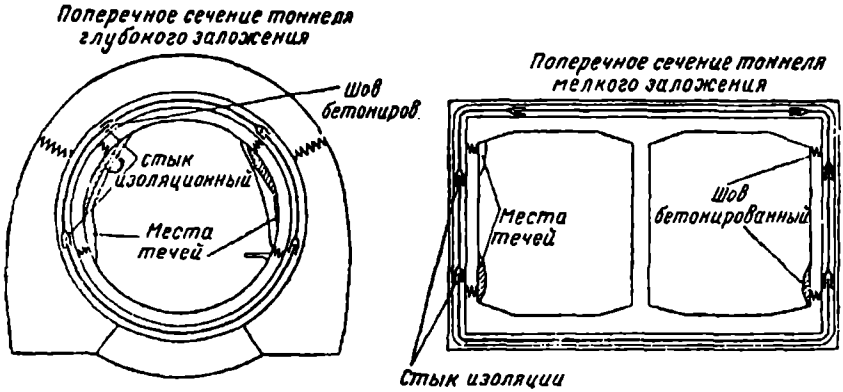

Рис. 1.2. Схемы расположения мест фильтрации (по поперечному сечению)

В отдельных случаях на станциях фильтрация через некоторое время самопроизвольно уменьшается и исчезает. Часто после исчезновения фильтрации в одном месте она появляется по соседству. 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 влиянием 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 оксида кальция.

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

Влияние 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 оксида 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.

Согласно исследованиям А.А. Шилина, надежность несущих конструкций подземных сооружений изменяется в течение эксплуатации по следующей зависимости (рис. 1.3):

$$\beta(t) = \beta(0)\left[1 - \frac{t^3}{\tau_0^3}\right], \qquad (1.1)$$

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

Качество строительства, срок службы подземного сооружения 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:

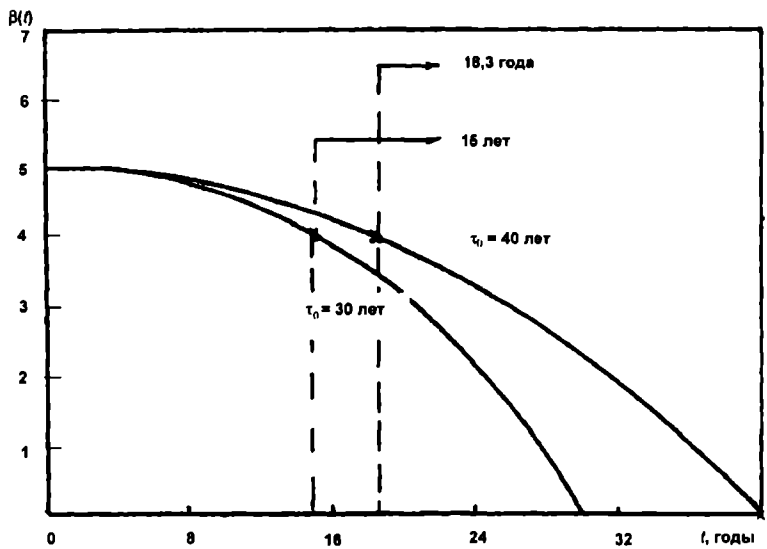

Рис. 1.3. Изменение надежности от времени эксплуатации подземного сооружения

- 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. 1.4.

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

Нами получено представление о состоянии более 19 751 м тоннелей метрополитена в однопутном исчислении и 56 142 м коллекторных тоннелей. Некоторые результаты и характеристи-

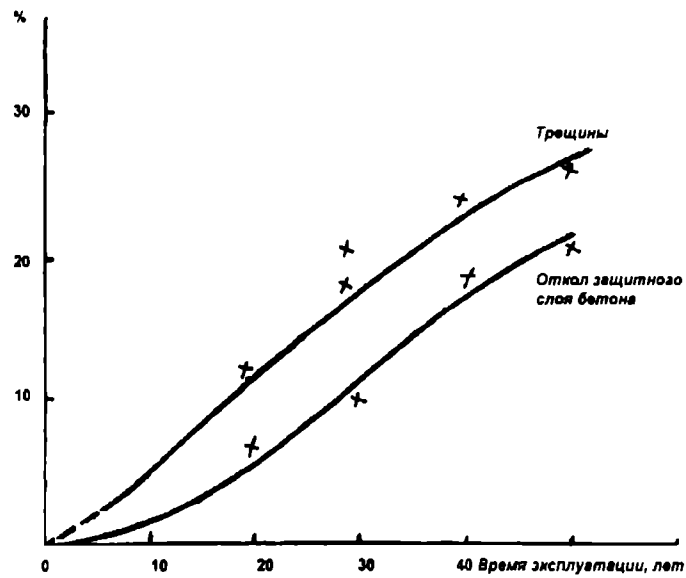

Рис. 1.4. Рост дефектов в конструкциях коллекторных тоннелей в зависимости от времени эксплуатации

ки этого освидетельствования представлены в табл. 1.3, 1.4, из которых следует, что все дефекты несущих конструкций обследованных подземных сооружений можно разделить на несколько типов.

1. *Трещины* продольного, поперечного, косодиагонального 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 под воздействием как 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 вызывающих появление изгибающих моментов. Образование трещин увеличивает 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.

Косодиагональные трещины приурочены к спинкам и ребрам железобетонных блоков и чугунных тюбингов и являются ре-

Таблица 1.3

№ п/п	Место нахождения тоннеля	Срок службы на момент обследования, лет	Размеры, м			Материал обделки		Стоимость	
			диаметр		длина обследованного участка	первичной	вторичной	строительства, тыс. руб.	ремонта, тыс. руб./%
			вчерне	в свету					
1	Коллектор «Новорязанская ул. — ул. К. Маркса»	2	2,0	1,4	1035	Ж/б блоки	Ж/б монолит	939 392	239 299 / 25,5
2	Коллектор по Сущевскому валу	3	2,0	1,5	1159	—	—	432 113	409 670 / 94,8
3	Новолюберецкий канал	15	3,6	2,75	8929	—	—	7 940 604	2 514 360 / 31,6
4	Главный коллектор Юго-Западного района	20	2,0	1,40	4303	Керамические блоки	Ж/б монолит	757 815	386 246 / 51,0
5	Правобережный Чуровской коллектор	22	2,0	1,4	2933	—	—	845 200	633 700 / 78,5
6	Московский метрополитен. Перегон «Щукинская» — «Сходненская»	6	—	5,5	7491	Унифицированный железобетон — 39,3 %, чугунные тюбинги — 60,7 %	—	—	—
7	Московский метрополитен. Перегон «Марксистская» — «Новогиреево»	2	—	5,5	12 260	Сборная ж/б, унифицированный железобетон, чугунные тюбинги, комбинированная обделка	—	—	—

Таблица 1.4

№ п/п	Место нахождения тоннеля	Удельный вес дефектов						
		Общая доля нарушений, %	Течи, «свищи», на 1000 м	Разрушения, размыв лотка, %	Трещины, сколы, %	Просадка лотка, %	Смещение колец, %	Эллиптичность, %
1	Коллектор «Новорязанская ул. — ул. К. Маркса»	9,2	7,3	2,0	0,6	1,6	—	—
2	Коллектор по Сущевскому валу	30	45	21,6	2,3	3,5	—	—
3	Новолюберецкий канал	21,8	25	13,9	2,05	6,7	—	—
4	Главный коллектор Юго-Западного района	56	31	56	0,23	—	—	—
5	Правобережный Чуровской коллектор	55,3	25	47	3,47	—	—	—
6	Перегон «Щукинская» — «Сходненская»	10,7	0,06	—	7,88	0,9	10,7	—
7	Перегон «Марксистская» — «Новогиреево»	—	1	—	9,4	0,2	0,7	4,8

зультатом несоответствия 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 диаметром 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 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 длиной 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 времени. На рис. 1.5 приводятся результаты обработки данных о возникновении

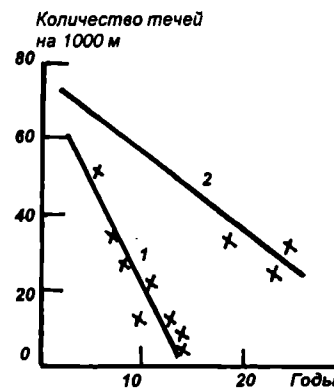

Рис. 1.5. Снижение образования течей через обделку подземного сооружения во времени:
1 — коллекторные тоннели Москвы; *2* — тоннели Тбилисского метрополитена