

*М*ОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



РЕДАКЦИОННЫЙ

С О В Е Т

Председатель

Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя

Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета

И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКОВСКОГО

ГОСУДАРСТВЕННОГО

ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

Е.Ю. Куликова

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по основным образовательным программам магистров 550605 «Строительство шахт и подземных сооружений» и 550611 «Сооружение подземного пространства городов» направления подготовки магистров 550600 «Горное дело»



МОСКВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
2005

УДК 622:27:502.3 (047.7)

ББК 33.3

К 90

*Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Российской Федерации по образованию
в области горного дела (письмо № 51-108/6 от 30.11.2004)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям
книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253-3», утвержденным Главным
государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.Ж. Аренс* (вице-президент
Российской академии естественных наук),

д-р техн. наук, проф. *М.И. Щадов* (президент
Международного горного конгресса)

Куликова Е.Ю.

К 90 Методология выбора экологически безопасных технологий
подземного строительства: Учебное пособие для вузов. – М.:
Издательство Московского государственного горного универ-
ситета, 2005. – 342 с.: ил.

ISBN 5-7418-0374-1

Даны анализ современных подходов к обеспечению экологической безопасности городского подземного строительства и оценка влияния технологий строительства подземных сооружений на формирование факторов экологического риска. Приведены классификации подземных сооружений коммунального назначения, экологических рисков при освоении подземного пространства городов, критерии экологической безопасности для обоснования новых методологических подходов к выбору технологии строительства подземных сооружений. Показано влияние длительной эксплуатации подземных объектов города на их экологическую надежность. Изложены результаты эксперимента и методические основы определения безопасного состояния работы природно-технической системы «породный массив – технология – подземное сооружение».

Для студентов вузов, обучающихся по основным образовательным программам магистров 550605 «Строительство шахт и подземных сооружений» и 550611 «Сооружение подземного пространства городов» направления подготовки магистров 550600 «Горное дело».

УДК 622:27:502.3 (047.7)

ББК 33.3

ISBN 5-7418-0374-1

© Е.Ю. Куликова, 2005

© Издательство МГГУ, 2005

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2005

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия проблемы городского строительства и охраны окружающей среды поставили на повестку дня задачу хозяйственного освоения недр под промышленными и культурными центрами. Тысячи километров подземных дорог, коммунальных служб, производственных помещений сооружены под большими городами. Рассматриваются проекты развития Москвы за счет создания ее глубинных «этажей». Освоение подземного пространства мегаполисов позволяет снизить техногенную нагрузку на природный ландшафт, сэкономить материалы, разгрузить транспортные сети, сократить протяженность инженерных коммуникаций, эффективно обезвредить отходы производства, повысить комфорт населения и улучшить состояние окружающей среды.

Освоение подземного пространства городов позволяет решать проблемы экологии градостроительными методами в плане взаиморазмещения различных объектов и их комплексов, оказывающих серьезное влияние на окружающую среду, определять на далекую перспективу состояния этой среды, а также оптимальные подходы к экологически обоснованной организации территории.

Подземное хозяйство современных городов и промышленных предприятий имеет сложную разветвленную систему, состоящую из сетей, коллекторов и сооружений на них. Эти объекты представляют собой коммунальные подземные сооружения, входящие в инженерную инфраструктуру города. Только в Москве расположено 8420 км водопроводов; 10 000 км трубопроводов теплоснабжения и горячей воды; 6077 км газопроводов и 5920 км коллекторов различного назначения.

В настоящее время водопроводными сетями РФ подается около 25,5 млрд м³ воды в год. Мощность водопроводов достигла 94,5 млн³/сут, протяженность водопроводных сетей составляет 434 тыс. км. По данным Госсанэпиднадзора России, в 2000 г. 20 % проб воды коммунальных и 23,6 % ведомственных водопроводов не отвечали гигиеническим нормативным

показателям, и 8,1 и 12,4 %, соответственно, – по микробиологическим критериям.

Мощность очистных сооружений коммунальной канализации в РФ составляет 60,3 млн м³/сут, протяженность коммунальных канализационных сетей населенных пунктов достигла 105,2 тыс. км. В городах из общего числа эксплуатируемых канализационных сооружений 69 % перегружены. Сброс коллекторно-дренажных вод способствует загрязнению подземных вод. Из общего объема подземных вод, забираемых на хозяйственно-питьевые цели, 5–6 % загрязнены соединениями азота, сульфитами, хлоридами, нефтепродуктами, фенолами, солями тяжелых металлов и другими вредными веществами, содержание которых достигает 5 ПДК. Выявлено около 1800 очагов загрязнения подземных вод, из которых почти 80 % приходится на долю Европейской части России.

Основными элементами подземного хозяйства городов являются подземные инженерные сети. В Москве около 300 автозаправочных станций. Представляется целесообразным осуществлять транспортировку бензина и масел по подземным трубопроводам. Для дальнейшего улучшения санитарного состояния города предусмотрен пневматический транспорт для удаления бытового мусора, доставки корреспонденции и т.п. Проведенные расчеты показали, что использование подземного пространства города в этих целях позволит сэкономить около 8,3 % городской территории (7,2 тыс. га). Более 6300 км подземной инфраструктуры Москвы составляют канализационные тоннели и сети, относящиеся к коммунальной сфере города. Ежегодно канализационная сеть города увеличивается в среднем на 100 км. Осуществляется модернизация канализационных сетей с применением новых полимерных материалов для защиты от коррозии; проводятся работы по диагностике сетей при помощи специального телевизионного оборудования; внедряются новые бестраншейные технологии ремонта коллекторов.

Однако, несмотря на положительный эффект от освоения подземного пространства мегаполисов, подземное строитель-

ство способно оказывать негативное влияние на окружающую среду в результате нарушения режима подземных и поверхностных вод; загрязнения водного бассейна за счет утечек из систем канализации и водоснабжения; сброса в водные объекты неочищенных или недостаточно очищенных бытовых и промышленных сточных вод, а также поверхностного стока с урбанизированных территорий; образования провалов и оседания поверхности; выбросов в атмосферу от работы машин и оборудования и т.п. Состояние коммунальных подземных объектов зачастую таково, что наносит дополнительный вред и без того ненормальной искусственной экосистеме города.

Большую экологическую опасность представляет ветхость канализационных сетей (на долю которых приходится свыше 20 % аварий от их общего количества), так как аварийная утечка сточных вод вызывает загрязнение подземных горизонтов пресных вод; поступление болезнетворных микроорганизмов и токсических веществ в окружающую среду. Дефицит мощностей канализационных сооружений в настоящее время в РФ достигает около 9 млн м³/сут; более 1/3 всех систем требует полной замены. Доля разрушений дворовых сетей составляет 80,8 %, городских – 19,2 %. Большую роль в преждевременном разрушении коллекторов играет материал обделки. Так, на долю керамических блоков приходится 83,5 % разрушений, чугунных – 9,6 %, бетонных и железобетонных – 6,9 %. На капитальные ремонты подобных коллекторов тратится 40–45 тыс. руб. на 1 м тоннеля. Первоначальные капиталовложения и расходы на эксплуатацию подземных сооружений могут доходить до 75 % стоимости основных фондов.

Значительная часть финансовых средств (до 30 % от стоимости строительства каждого кубометра сооружения в пересчете на 1 год эксплуатации) уходит на борьбу с отказами несущих конструкций, среди которых основное место занимает нарушение гидроизоляционных свойств обделок. Опыт эксплуатации и натурные наблюдения действующих тоннелей приводят к выводу, что недостаточная надежность несущих конструкций подземных сооружений закладывается

еще на стадии проектирования и обусловлена нерешенностью многих вопросов взаимодействия подземных сооружений и вмещающих пород, отсутствием четких представлений о характере такого взаимодействия.

Освоение подземного пространства наряду с природными (карст, суффозия, плывуны, сейсмичность, наличие насыпных и просадочных грунтов, размывы, деформирующиеся песчано-глинистые толщи), осложняется техногенными факторами. Это требует строго научного подхода к вопросам его инженерно-геологического, гидрогеологического и геометрического изучения. Поэтому вопрос обеспечения экологической безопасности подземных сооружений города стоит крайне остро.

Актуальной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение, является обоснование методологии выбора технологий строительства подземных сооружений, соответствующих современному подходу к сохранению окружающей среды, технико-экономической целесообразности, с учетом новых акцентов в подземном строительстве, достижений современной подземной архитектуры, градостроительной эстетики. С другой стороны, критерии выбора экологически безопасных технологий строительства подземных объектов должны обосновываться с учетом современных способов обеспечения устойчивости массива, определяющей его эксплуатационную надежность, методов прогнозирования механических и гидрогеологических процессов в окружающих породах, а также методов расчета параметров технологической надежности подземного сооружения. Таким образом, определяющие аспекты таких областей знаний, как строительная геотехнология, геофизика, геомеханика и теории проектирования освоения подземного пространства должны быть направлены на формирование экологической безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений.

Основой обеспечения экологической безопасности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений является обоснование и разработка мероприятий инженерной

защиты окружающей среды от негативных проявлений техногенного вмешательства в земные недра, атмосферу, гидросферу и земную поверхность, нацеленные на восстановление экологического баланса в природно-технической системе «породный массив – технология – подземное сооружение».

Большой вклад в изучение вопросов методологии проектирования и системного анализа внесли В.Д. Аюров, Б.А. Картозия, А.В. Корчак, Л.А. Пучков, В.А. Харченко. Вопросам экологической безопасности уделено внимание в трудах Н.В. Демина, В. Маршала, В.И. Осипова, В.А. Умнова, Э.Дж. Хенли.

Основы обеспечения надежности несущих и ограждающих конструкций, технологической и эксплуатационной безопасности заложены в трудах И.В. Баклашова, П.П. Бессолова, Б.В. Бокия, В.Н. Борисова, Н.С. Булычева, З. Вайды, С.Н. Власова, М.М. Вяльцева, В.А. Гарбера, Г.Е. Голубева, Дж. Диксона, Б.М. Дягтерева, А.Ф. Зильберборда, Д.Р. Каплунова, Б.А. Картозия, Я. Келемена, Ю.И. Коломийца, Е.А. Котенко, А.М. Кириленко, Ю.Е. Крука, Ю.Н. Куликова, В.Г. Лернера, Л.В. Маковского, Н.Н. Мельникова, В.Е. Меркина, В.М. Мосткова, И.Д. Насонова, О.Н. Павлова, Е.В. Петренко, Я.В. Подикова, Н.М. Покровского, В.Л. Попова, А.Г. Протосени, Н.К. Розенталя, К.В. Руппенейта, А.А. Сегединова, В.И. Смирнова, К.Н. Трубецкого, Б.И. Федунца, Н.Н. Фотиевой, Ю.С. Фролова, П. Хилла, В.Г. Храпова, В.А. Хмяляйнена, К. Цастрау, Т.Н. Цая, П.М. Цимбаревича, В.А. Чантурия, Н.Н. Чаплыгина, Е.И. Шемякина, А.А. Шилина, М.Н. Шуплика;

Основы идентификации экологических рисков заложены в работах А.А. Аверчикова, А.А. Гусева, В.И. Данилова-Данильяна, Х. Куамото, И.И. Мазура, С.Н. Мазура, Е.И. Панфилова, И.В. Петрова, А.В. Полуторного, Э.А. Уткина и др.

В практике проектирования экологические, технологические и технические аспекты строительства и эксплуатации подземных сооружений рассматриваются в недостаточной увязке друг с другом. В настоящее время в достаточной степени изучены основные принципиальные схемы взаимодействия обделок сооружений с окружающим породным массивом.

вом, но пока еще недостаточно учтены вопросы взаимодействия компонентов окружающей среды между собой и их влияние на напряженное состояние самих обделок и вмещающего подземные объекты массива горных пород. Недостаточно рассмотрены вопросы токсического воздействия средств химического укрепления грунтов и материалов гидроизоляции; экологические последствия традиционных технологий и специальных способов строительства, т.е. те вопросы, без изучения которых невозможна выработка стратегии минимизации экологической опасности при подземном строительстве и осуществление мероприятий инженерной защиты окружающей среды от вредного влияния городских подземных сооружений. Все эти вопросы находятся в ведении нового научного направления – экологической безопасности строительства и эксплуатации городских подземных сооружений.

Глава 1

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*1.1. Классификация подземных сооружений
коммунального назначения*

*1.2. Источники, виды и характер воздействия
подземных сооружений на окружающую среду*

*1.3. Анализ существующих технологий подземного
строительства с позиций экологической
безопасности*

*1.4. Оценка состояния инженерной защиты
окружающей среды при подземном строительстве*

*1.5. Основополагающие принципы обеспечения
экологической безопасности при городском
подземном строительстве*

1.1

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ КОММУНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для корректного подхода к выбору экологически безопасных технологий строительства подземных сооружений необходимо различать к какому типу они относятся в соответствии с классификационным признаком. В настоящее время не существует представительной, научно обоснованной классификации подземных сооружений коммунального типа. Типы коммунальных сооружений учитываются лишь в системе общей классификации подземных объектов. По некоторому ряду признаков в научной литературе имеется систематика коммунальных сооружений. Например, Н.М. Покровский, В.П. Волков, Н.Ф. Федоров, С.Ф. Веселов, П.П. Бессолов, А.А. Сегединов, Я. Келемен, З. Вайда в своих трудах касаются аспекта деления коммунальных сооружений по назначению и по способу прокладки; Г.Е. Голубев в общей классификации всех подземных сооружений освещает аспект их деления по объемно-планировочной схеме; Е.В. Петренко – проблему размещения коммунальных подземных объектов в городе. Однако комплексная классификация сооружений подобного типа отсутствует. Не уделяется должного внимания санитарно-гигиеническим требованиям, во многом ограничивающим степень использования подземного пространства; функциональной и композиционной взаимосвязи с другими объектами; экологическим аспектам. Исходя из этого, разработана классификация коммунальных подземных сооружений, учитывающая характер воздействия подземных объектов этого типа на окружающую среду.

Все коммунальные подземные сооружения подразделяются на несколько групп в соответствии с определяющим классификационным признаком. Основное деление коммунальных подземных сооружений производится по назначению, способам прокладки и использования и по степени экологической безопасности (рис. 1.1).

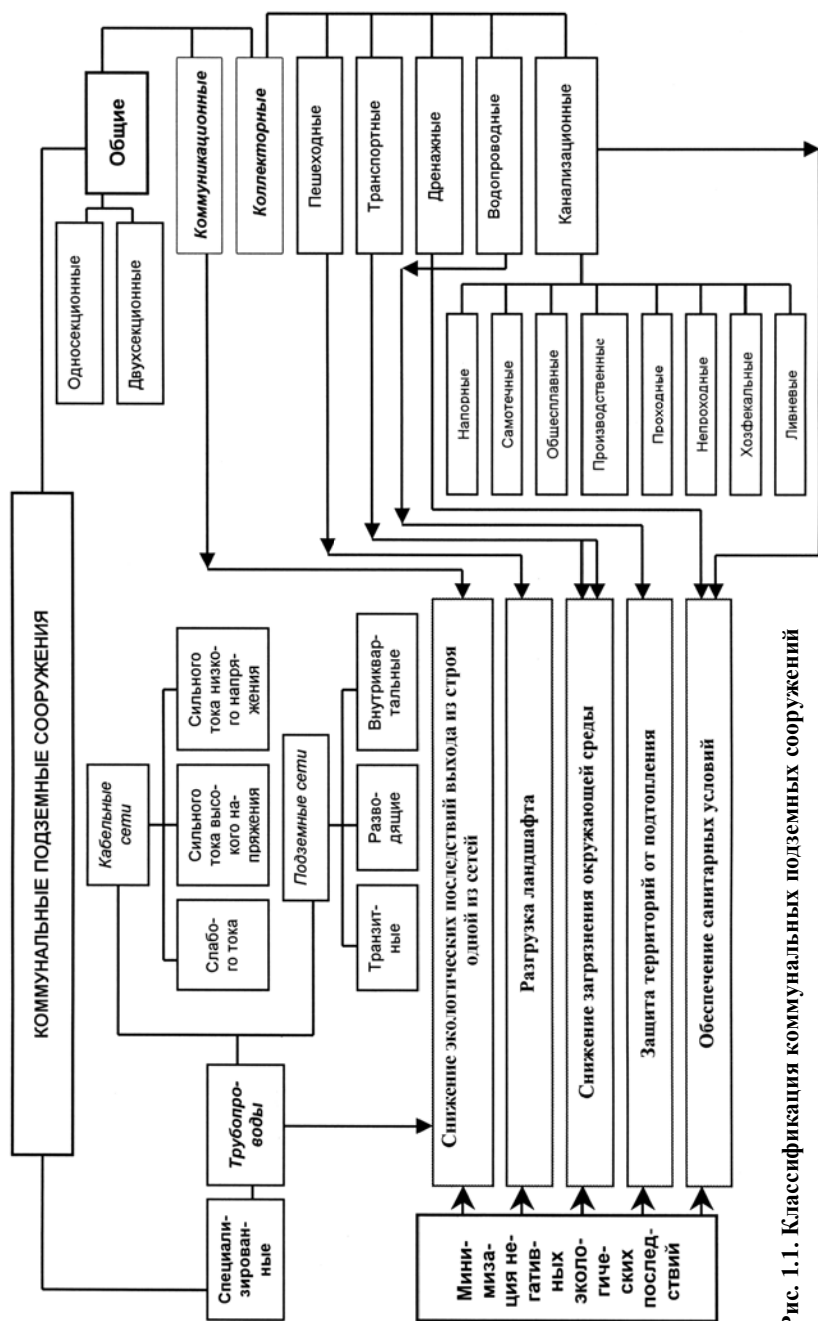


Рис. 1.1. Классификация коммунальных подземных сооружений

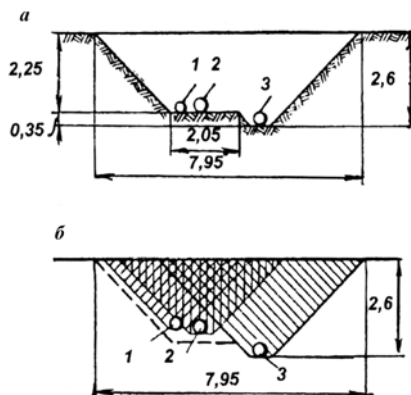


Рис. 1.2. Размещение трубопроводов в общей траншее:

а – одновременно; *б* – в разное время; 1 – газопровод диаметром 250 мм; 2 – газопровод диаметром 400 мм; 3 – водопровод диаметром 300 мм

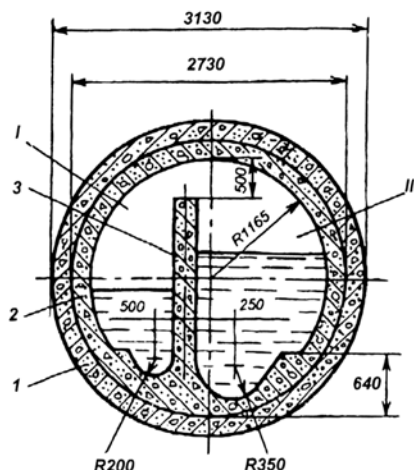


Рис. 1.3. Совмещенный канализационный тоннель:

I – отделение хозяйственных стоков; *II* – отделение дождевых стоков; 1 – сборная железобетонная обделка тоннеля; 2 – вторичная обделка; 3 – разделительная перегородка из монолитного железобетона

В связи с высокой пропускной способностью канализационных тоннелей, с одной стороны, и со стремлением разместить в одном тоннеле возможно больший комплекс коммуникаций, с другой, площади поперечных сечений современных коллекторов достигают 16 м². Поэтому более рациональной в технико-экономическом отношении является совмещенная проходка коммунальных сетей (рис. 1.2), что приводит к уменьшению земляных работ на 35–40 % и к снижению стоимости строительства на 15–30 %, либо прокладка в общих коллекторах (рис. 1.3).

По месту размещения коммунальных сооружений в подземном пространстве города в зависимости от категорий улиц и дорог осуществляется следующий порядок прокладки:

- на городских улицах местного значения (ширина 10,5–25 м) – кабели сильного, слабого тока и осветительные; трубопроводы тепловых, водопроводных, канализационных и газовых водосточных сетей (4–5 прокладок);

- на магистральных улицах районного значения (ширина 25–35 м) – кабели сильного, слабого тока и осветительные; трубопроводы тепловых, водопроводных, канализационных и газовых водосточных сетей (5–6 прокладок);

- на магистральных улицах общегородского значения (ширина 30–70 м) – кабели сильного, слабого тока и осветительные; трубопроводы тепловых, канализационных, газовых, водопроводных и водосточных (по обеим сторонам улицы) сетей (6–7 прокладок).

По способу размещения в условиях городской застройки:

- на полосе между красной линией и линией застройки – кабельные сети (силовые, связи, контрольные кабели);

- под тротуарами – тепловые сети или проходные коллекторы (под тротуарами следует предусматривать прокладку силовых кабелей, кабелей связи и контрольных при отсутствии пространства между красной линией и линией застройки);

- под проезжими частями улиц и дорог – сети водоснабжения, газоснабжения и хозяйственно-бытовой канализации.

В наших исследованиях основной акцент сделан на коммунальные подземные сооружения, поэтому весь последующий материал будет затрагивать аспекты обеспечения экологической безопасности применительно к этим подземным сооружениям.

Канализационные тоннели, транспортирующие бытовые и производственные сточные воды на десятки километров, относятся к особой категории в классификации из-за трудности заранее предвидеть вероятность реконструкции в течение нормативного срока эксплуатации в условиях многофакторности воздействия среды на конструкцию. Поэтому вероятность формирования ситуации экологического риска при эксплуатации этих сооружений определяется такими категориями, как непосредственно аварийность, обеспеченность водоотведения и капитальность.

Под *аварийностью* понимается возможность разрушения конструкций канализационного тоннеля под воздействием природных и техногенных факторов. Аварийность определяется по бальной системе.

Под *обеспеченностью водоотведения* понимается наличие совокупности методов, средств и мероприятий, выполняемых на стадии проектирования, строительства и эксплуатации тоннеля и на-

правленных на организацию отведения расходов сточной жидкости. По этому признаку канализационные тоннели подразделяются на три категории. К категории I относятся канализационные тоннели, не обеспеченные дублированием, обслуживающие городские территории, не имеющие водных протоков и возможности сброса сточных вод в аварийных ситуациях. Выключение из работы тоннеля данной категории может привести к значительному экологическому и социально-экономическому ущербу, соизмеримым с экологической катастрофой. К категории II относятся канализационные тоннели, в которых имеется возможность непродолжительного сброса сточных вод в близлежащий водоем при надлежащем разрешении или использовании передвижных насосных станций для перекачки вод в близлежащую сеть. Выключение из работы канализационного тоннеля данного типа может быть отнесено к категории аварии, и привести к значительным экономическим потерям. К категории III относятся канализационные тоннели, которые имеют возможность переключения транспортируемого расхода сточных вод в дублирующие тоннели или позволяют осуществлять переключение стоков на уровне подключения. Выключение из работы канализационного тоннеля или его участка не приносит экономических и экологических потерь.

Под *капитальностью* понимается комплекс конструктивных особенностей канализационных тоннелей при проектировании, и реализуемый при строительстве и эксплуатационных мероприятиях, направленных на отведение сточных вод согласно категории обеспеченности водоотведения в течение нормативного срока (100 лет). К первой категории капитальности относят канализационные тоннели, конструкции которых выполнены из высокопрочных, антикоррозионных материалов, не подвергающихся истиранию, с использованием специальных полимерных покрытий, способных работать в агрессивных средах. Такие тоннели являются достаточно надежными с позиций экологической безопасности. Ко второй категории относятся канализационные тоннели, отдельные элементы, конструкции которых выполнены из материалов, не способных противостоять действию как внутренней, так и наружной агрессивной среды в течение заданного срока службы. Тоннели данной категории являются экологически неблагонадежными. К третьей

Характеристика коммунальных тоннелей

№ п/п	Вид тоннелей	Функциональное назначение	Положительный экологический эффект	Отрицательный экологический эффект
1	Канализационные	Транспортирование канализационных стоков по сечению тоннеля и прием их из сетей, прокладываемых открытым способом	Обеспечение санитарных условий населенных мест	Возможность утечек содержимого коллектора; заражение окружающей среды болезнетворными микроорганизмами и отравляющими веществами
2	Водопроводные	Транспортирование воды по сечению тоннеля	Контроль за санитарными нормами	Тепловое загрязнение окружающей среды при утечках, химическое и биологическое загрязнение
3	Коммуникационные	Совместная прокладка водопровода, теплотрасс, напорной канализации, кабелей и т.п.	Снижение негативных экологических и экономических последствий при выходе из строя одной из сетей	Изменение сложившегося теплообмена, режима промерзания и оттаивания пород в зоне теплотрасс; стигмулирование более ранней вегетации зеленых насаждений,
4	Гидротехнические	Транспортирование воды в составе электрических станций, пропуск рек, каналов	Поддержка санитарных условий и режима эксплуатации ГЭС	Изменение режима и характера миграции подземных вод, водного баланса в районе строительства
5	Пешеходные	Перемещение пешеходных потоков под улицами, площадями, путями сообщения	Разгрузка ландшафта, сохранение плодородного слоя почвы	Нарушение условий подземного и поверхностного стока, разуплотнение пород
6	Транспортные	Размещение межцеховых транспортных коммуникаций (конвейеры и т.п.)	Снижение степени загрязнения окружающей среды	Динамические воздействия на породу, изменение структуры пород
7	Дренажные	Дренаж грунтовых вод через обделку, прием дренажных вод из фильтров и их транспортирование	Защита территорий промпредприятий от подтопления	Изменение режима и характера миграции подземных вод

категории относятся тоннели, конструкции которых выполнены из материалов, способных работать в нормальных неагрессивных средах в течение заданного срока службы и не требующие специальных мероприятий по их защите.

По характеру проявления экологического эффекта. Подобное деление осуществлено в зависимости от назначения коммунального подземного сооружения (табл. 1.1).

Коммунальные сооружения занимают значительный удельный вес в системе подземных сооружений города. Переход от традиционных методов открытой прокладки инженерных коммуникаций к подземному строительству коммунальных тоннелей открывает значительные перспективы для обеспечения сохранности окружающей среды, экономии энерго- и материальных затрат, снижения капиталовложений для поддержания этого типа подземных объектов. Однако до настоящего времени многие коллекторы проектируются как неремонтопригодные системы, при отсутствии надежной антикоррозионной защиты от вредных выделений сероводорода, сернистого газа, кислот, образующихся на контакте с влажной средой, что повышает аварийную опасность этих сооружений не только в технологическом, но и в экологическом отношении.

Целью приведенной классификации является систематизация типов коммунальных подземных сооружений по ряду признаков, позволяющая определить слабые места в системе «массив – технология – сооружение» и выработать основу для дальнейшей разработки экологически безопасных технологий строительства. Только при учете взаимодействия и взаимовлияния всех природных, технических, технологических факторов возможно обеспечение минимизации негативных экологических последствий коммунального подземного строительства.

1.2

ИСТОЧНИКИ, ВИДЫ И ХАРАКТЕР ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Коммунальные тоннели предназначены для сокращения отрицательного воздействия техногенной деятельности на окружающую городскую среду. Однако очень часто в практике подземного строительства технологические процессы, связанные со строительством и эксплуатацией коммунальных тоннелей, становятся основными факторами возникновения экологического риска. Так, авария на Люберецких очистных сооружениях привела к заражению близлежащей местности и на много лет создала благоприятные условия для развития болезнетворных бактерий и вспышек эпидемий, казалось бы, отживших уже болезней: тифа, паратифа, холеры и т.п. Прорыв канализационных тоннелей в Борисовские пруды вывел из строя зону отдыха и создал экологически неблагоприятную обстановку в районе. Аварии в системах канализации города Орел неоднократно приводили к заражению вод р. Оки, охватывая территории нескольких областей Центра России. Пляжи курортных черноморских городов постоянно подвергаются загрязнению фекальными стоками, катастрофически повышают зараженность прибрежных вод. По характеру взаимодействия все основные виды техногенных нарушений природной среды, спровоцированные коммунальным подземным строительством, можно разделить на пять видов (табл. 1.2).

Выделим несколько наиболее типичных техногенных воздействий на окружающую среду при строительстве коммунальных тоннелей, влияющих на экологическую безопасность освоения подземного пространства в данном регионе.

1. *Геомеханические нарушения земной поверхности и массива пород* (оседание и провалы земной поверхности, образование воронок, деформация массива, обрушение пород и т.п.).

2. *Изменение режима подземных вод*, что связано с понижением горизонта грунтовых вод, изменением режима и направления потоков, усилением или замедлением динамики вод; образование

Изменения в окружающей среде под влиянием подземного строительства

Характерные виды нарушений	Причины, вызывающие нарушения окружающей среды
1. Геомеханические Изменение рельефа местности, геологической структуры массива, грунтов, подстилающих почву, самой почвы. Механические повреждения почв. Уничтожение почвы и создание биологически стерильных территорий. Изменение структуры использования поверхности, просадки, оседания. Повреждения строительных объектов и инженерных сооружений	Оборудование горно-строительной площадки, строительство котлованов (траншей). Деформации поверхности в результате строительства подземных сооружений. Монтажные работы, воздействие тяжелого оборудования и пр.
2. Гидрогеологические Изменение уровня подземных вод и их движения, гидрографической сети. Ухудшение качества вод неглубоко залегающих водоносных горизонтов, инженерно-геологических констант подпочвенных грунтов, водного режима в почве. Уменьшение запасов подземных вод. Увеличение суффозии и механического уплотнения грунтов (оседание поверхности). Изменение морфодинамического режима, образование пойм	Дренарующее воздействие подземных и открытых выработок на окружающий породный массив, деформации поверхности в связи с дренажем подземных вод, сооружение отстойников, разнообразных насыпей, траншей. Смещение русел водотоков, сооружение водоемов, водных перепадов и других гидротехнических объектов. Загрязнение и откачка подземных вод
3. Термические Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, биохимических процессов в водном бассейне, изменение микроклимата	Загрязнение воздуха, сбросы подогретых вод и нагнетание их в породный массив
4. Химические Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, водоподкисление, засорение, загрязнение почв (подкисление, алкализация, засоление, увеличение фитотоксических элементов) и другие типы загрязнений	Эмиссии газов и химически активной пыли. Сбросы загрязненных вод. Воздействие токсичных компонентов от машин и оборудования, находящихся в материалах гидроизоляции и химического укрепления грунтов, растворах
5. Физико-механические Изменение состава и свойств атмосферного воздуха и вод. Кольматация русел водотоков. Изменение свойств почв	Эмиссия пыли и аэрозолей. Сбросы вод, загрязненных суспензией и гидроаэрозолями

депресссионных воронок, способствующих провалам и оседаниям земной поверхности. В конечном итоге, подобные явления коренным образом изменяют всю экосистему подземного пространства. Примером может служить Царицынский парковый комплекс. Изменение режима стока подземных вод к Царицынским прудам в 1980-х гг. вызвало оползень канализационного коллектора и выход на многие годы из строя зоны отдыха прилегающих районов. Заражение окружающей среды фекальными массами потребовало чрезвычайных мер по погашению вспышек холеры и других эпидемических вспышек.

Особо опасным проявлением изменения режима подземных вод является *прорыв водных масс в выработки и их затопление*. Примером прорыва водных масс и затопления тоннеля является строительство в Париже канализационного тоннеля в глинах и меловых отложениях щитовым способом с установкой первичной обделки. Предполагалось, что тоннель отделен от водоносных аллювиальных отложений слоем глины мощностью около 4 м, однако оказалось, что на одном из участков они залегают ниже. Таким образом, из-за недостаточной изученности района строительства и ошибок в прогнозе расположения водоносных структур произошло затопление тоннеля потоком воды с грунтом и частичное разрушение первичной обделки. Примером изменения режима подземных вод при проходке коммунального тоннеля является и авария в Москве на ул. Большая Дмитровка (1998 г.), где из-за нарушения технологии при прокладке коммуникаций произошел обвал грунта общей площадью 500 м² и практически полностью разрушился дом № 18.

3. За счет вышеописанных явлений происходит *изменение системы переноса вещества, химического взаимодействия, растворение и разложение субъектов массива горных пород*, что, в свою очередь, приводит к изменению состава и свойств грунта, провалам, просадкам, выделениям вредных веществ, усилению процессов коррозии и иных видов разрушения самих подземных сооружений. Это способствует их быстрому выходу из строя и требует значительных финансовых и материальных затрат на ремонтно-восстановительные работы. Примерами таких просадок и провалов являются: провал одной из стен пятиэтажного дома на Хорошевском шоссе в образовавшуюся карстовую воронку (1969 г.); просадка

трехметрового участка улицы Куусинена (1973 г.); образование воронки на проезжей части проспекта Маршала Жукова (1996 г.); осадка земной поверхности в Новохорошевском проезде (1977 г.), которая привела к полному разрушению домов № 3, 4.

4. Изменение минералогической структуры грунта приводит к *изменению электрических полей* в подземном пространстве и порождает появление блуждающих токов. Так как подземные воды являются наиболее подвижным элементом системы «массив – сооружение», активно реагирующим на любое техногенное вмешательство, то строительство подземных объектов сопровождается интенсификацией фильтрационных электрических полей. Возникновение электрического поля в массиве, как правило, сопровождается изменением биологической составляющей, что выражается в следующих основных моментах: усиливается биологическая коррозия сооружений; происходит заражение массива вмещающих подземный объект пород болезнетворными организмами, что, в первую очередь сказывается на качестве воды и, следовательно, на здоровье населения. Определенная часть подобных негативных эффектов учитывается при проектировании, однако отсутствует комплексная оценка строительства с позиций экологии в его взаимодействии с ранее пройденными выработками, подчас уже забытыми. Основной процент аварий приходится на старые районы города, где подземное строительство нарушает забытые, отслужившие свой срок коммуникации.

5. Прорывы коммуникаций и *миграция загрязняющих веществ в окружающую среду*. Примером миграции загрязняющих веществ в окружающую среду может служить ситуация, сложившаяся при аварии на коллекторе вблизи жилого дома на ул. Новаторов, квартал 38, стр. 2 (2000 г.). Стоки из коллектора стали скапливаться под домом, и грунтовые воды поднялись на полтора метра. В результате из песчано-глинистой почвы, на которой покоился фундамент новостройки, образовался плывун и 22-этажное здание начало крениться. В районе лифтовых шахт отклонение от вертикали составило 14 см.

6. *Загрязнение водоносных горизонтов пресных вод за счет утечек из канализационных тоннелей и теплофикационных сетей*. Процессы эксфильтрации загрязненных вод из коммунальных тоннелей – неизбежное следствие применяемых конструктивных ре-

шений любых водонесущих коммуникаций вне зависимости от способа их строительства. Основной причиной эксфильтрации является несовершенство существующих обделок и гидроизоляции тоннелей. Наиболее серьезными в плане экологии являются последствия при расположении канализационных тоннелей в сухих водопроницаемых грунтах, которые могут быть гидравлически связаны с безнапорными водоносными горизонтами незагрязненных пресных вод. При эксплуатации коммунальных тоннелей определенную опасность по отношению к водной среде представляет сброс дренажно-аварийных стоков при прокладке напорных трубопроводов хозяйственно-фекальной и промышленной канализации. Незначительные загрязнения грунтового массива и подземных вод происходят в период строительства за счет утечек различных масел из гидросистем проходческих щитов, комбайнов и других машин. Степень влияния этого фактора нуждается в обязательном изучении.

7. Развитие суффозионных явлений, плывунов и псевдоплывунов. Суффозный вынос может вызвать разрушение обделки подземного сооружения. При этом над сооружением в пределах призмы обрушения возникает грунтовый свод над пустотой, с его последующим разрушением под воздействием вышележащих грунтовых масс или временных нагрузок от транспортных средств. Полное разрушение обделки происходит за счет падающего грунтового столба и отсутствия бокового отпора. Отсутствие бокового отпора, в свою очередь, связано с размывом грунта за обделкой текущей канализационной жидкостью и фильтрацией грунтовых вод. Этот период разрушения обделки коммунального сооружения совпадает с образованием воронки на земной поверхности. Вынос обводненного песка в процессе строительства и эксплуатации влечет за собой осадку тоннелей, величина которой может достигать десятков сантиметров. Нарушения земной поверхности в этом случае могут усугубляться в результате беспорядочной длительной откачки грунтовых вод из тоннеля. Так, подобная многомесечная откачка воды в Таллинне на одном из тоннелей привела к образованию вытянутой воронки на поверхности, при этом величина осадки тоннеля составила более 1 м при диаметре тоннеля в свету 1,8 м. Эта ситуация поставила под угрозу ввод в эксплуатацию канализационного ком-

плекса всего города. В качестве выхода из сложившейся ситуации была предложена замена подземной технологии проходки тоннеля на открытую – из котлована.

В Москве и Подмосковье в результате отбора вод на технические цели (3,5 млн м³/сут) образовалась депрессионная воронка диаметром более 100 км, в результате чего Москва и центральная часть области – Люберецкий, Мытищинский, Ленинский и другие районы – стали очень подвержены серьезным геомеханическим преобразованиям, проявляющимся в виде просадок и провалов земной поверхности. В результате интенсивного отбора вод напор грунтовых вод на Окско-Протвинском горизонте снизился на 100 м, там образовалась депрессионная воронка размером от 20 до 300 м в разных районах, постепенно увеличивающаяся на полметра в год. В Сергиевом Посаде воронка достигла 100 м. Подобные явления еще более осложняют поддержание проложенных в означенных районах коммунальных тоннелей.

8. *Оползневые явления.* При прокладке коммунальных тоннелей в условиях гористой или равнинной местности, изрезанной глубокими оврагами, всегда существуют предпосылки к приведению их в состояние неустойчивого равновесия при подрезке склонов. В дождливое время года наличие значительных объемов неустойчивых породных масс способствует развитию деформации склонов вместе с находящимися вблизи наземными объектами. Примером нарушения экологического баланса при подрезке коммунальными тоннелями склонов оврагов может служить следующая ситуация. В Волгограде при эксплуатации одного из канализационных тоннелей, расположенного в откосе оврага в массиве, сложенном сухими суглинками, произошло обрушение откоса вместе с тоннелем. В результате произошло опасное загрязнение окружающей среды: во-первых, утечка канализационных стоков, во-вторых, переход лёссовых пород в текучее состояние и образование плывуна.

9. *Деградация растительных и почвенных покровов* (при подземном строительстве незначительна в связи с малым отчуждением земель и срезанием плодородного почвенного слоя перед началом горно-строительных работ).

10. *Загрязнение атмосферы города ядовитыми веществами и взрывными газами.* Плотность застройки мегаполисов и характер

размещения предприятий вблизи жилых кварталов способствуют снижению безопасности подземных и других сооружений при их эксплуатации и в чрезвычайных ситуациях (ЧС). В таком крупном городе, как Москва, находятся 66 химически опасных и до сотни взрыво- и пожароопасных объектов, на большинстве производств используют сильнодействующие ядовитые вещества: хлор, аммиак и т.п. Системы рабочей, аварийной и противодымной вентиляции собирают вредные вещества на большой площади подземных объектов и локально выбрасывают их на поверхность. При пожарах, авариях и в других чрезвычайных ситуациях в зоне выброса предельная концентрация вредных веществ может превышать предельно допустимые концентрации (ПДК) в сотни раз, что повышает вероятность крупных ЧС. Статистика показывает, что ЧС в подземных сооружениях могут сопровождаться быстрым увеличением температуры среды, плотности дыма, концентрации токсичных газовойздушных смесей. Большое тепловыделение приводит к резким перепадам плотности воздуха, интенсивному распространению токсичных газовойздушных смесей в вертикальном и горизонтальном направлениях, как в подземных пространствах, так и на поверхности. Наибольшую опасность для людей при ЧС представляют дым и содержащиеся в нем токсичные газовойздушные смеси, в которых может содержаться до 70 токсичных соединений. Токсичные газовойздушные смеси могут образоваться не только при пожарах в подземных сооружениях, но и при утечке аммиака из холодильных установок, утечке хлора в хлораторных помещениях водоочистных сооружений и т.п.

11. Шумовое и вибрационное воздействие на атмосферу.

Как следует из проведенного анализа, четко разграничить проявление только природных или только техногенных факторов невозможно. Природные факторы могут усиливаться или проявляться в новом качестве под воздействием подземного объекта. Преобразование одного из компонентов окружающей среды приводит к дисбалансу всей экологической системы в целом. Эксплуатационные или технические параметры природно-технической системы (ПТС) могут существенно изменяться под влиянием суммирующего эффекта со стороны окружающей среды. Основные виды взаимовоздействия подземного объекта и окружающей среды показаны на диаграмме (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Схема взаимодействия подземного сооружения и окружающей среды

Основным элементом системы «массив – технология – сооружение», являющимся своеобразным проводником взаимного воздействия подземного объекта и окружающей среды является массив, вмещающий подземный объект.

В зависимости от размеров площади подземных сооружений различают следующие типы воздействия на породный массив:

- *компактные* (от котлованов, траншей и др.);
- *линейные* (от каналов, трубопроводов, тоннелей и др.);
- *площадные* (от горно-строительных площадок, очистных сооружений, станций аэрации и т.п.).

По продолжительности выделяются следующие виды воздействий:

- *мгновенные* (взрывы, обрушения масс породы);
- *ограниченные во времени* (бурение скважин для изысканий и оценки горно- и гидрогеологической обстановки в месте предполагаемого расположения сооружения, строительство подготовительных выработок);
- *длительные* (эксплуатация подземных сооружений).

В зависимости от способа ведения работ и характера подземного сооружения воздействие его на массив и окружающую среду проявляется по-разному. Техногенное вмешательство в породный массив нарушает характер деформационных процессов. Прежде всего это касается строительства подземных сооружений, которое сопряжено с изменением естественного напряженно-деформированного состояния породного массива, при котором могут возникнуть необратимые нарушения грунтов. Характер проявления и область распространения этих нарушений определяется целым рядом факторов, в первую очередь, способом ведения горно-строительных работ. При строительстве подземных выработок *открытым способом* нарушения грунтов возникают, главным образом, у стен подземного сооружения в пределах призм обрушения, ограниченных плоскостями скольжения, наклоненными под углом $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ к вертикали.

При строительстве подземного сооружения *подземным способом* нарушения массива охватывают область над выработкой и, в зависимости от глубины последней, могут достигать поверхности земли. В этом случае возможны осадки фундаментов наземных зданий, подземных коммуникаций, повреждения наземных транспортных сетей, что требует принятия специальных мер по ограничению сдвижений и деформаций поверхности земли и защите зданий и сооружений инженерными методами.

Глубина заложения подземного сооружения непосредственно влияет на развитие сдвижений и деформаций поверхности земли. *При мелком заложении подземного сооружения* породный массив над ним обладает незначительной несущей способностью, поэтому деформационные процессы проявляются быстро и величина их возрастает с уменьшением глубины заложения. *При глубоком за-*

ложении подземных сооружений величины сдвижений и деформаций возрастают, как правило, пропорционально глубине заложения и прочности пород, что объясняется увеличением зоны нарушенных пород и области массива, работающего совместно с обделкой подземного объекта.

Тип конструкции подземного сооружения также влияет на интенсивность деформационных процессов. Так, при применении в слабых неустойчивых грунтах недостаточно жесткой обделки, ее деформации могут вызывать смещения и деформации поверхности земли. В плотных грунтах, обладающих упругими свойствами, применение гибких обжатых в грунт сборных или монолитно-прессованных обделок способствует предотвращению нарушений массива и уменьшению геомеханических преобразований земной поверхности. Наибольшее влияние на состояние зданий оказывают вертикальные деформации поверхности земли: наклоны и кривизна. Наклоны основания приводят к кренам зданий, а искривления вызывают в них изгиб. Горизонтальные деформации сжатия и растяжения пород передаются на конструкции зданий в виде сил трения по подошве и боковой поверхности фундаментов. Влияние горизонтальных деформаций, как правило, менее существенно, чем вертикальных, поскольку они действуют на коротких участках, не захватывая всего здания.

Таким образом, деформационные процессы влияют не только на стабильность экологической системы в целом, но и на экологическую надежность и долговечность конструкций подземных сооружений.

Проявление природных и техногенных факторов в строящихся и эксплуатируемых подземных сооружениях во многом аналогичны, но обладают и особенностями, характерными для данного вида производства работ. На этапе строительства взаимное влияние природно-техногенных факторов носит характер внезапности и неожиданности, на этапе эксплуатации – это следствие длительных процессов разрушения и деформирования конструкций (за исключением таких видов проявлений как пожары и взрывы).

Кульминацией проявления совокупного влияния природных и техногенных факторов на элементы системы «массив – технология – сооружение» является аварийная ситуация. Например, статистика 2000 г. показывает, что наиболее негативное воздействие на состо-

яние экологической безопасности подземного строительства РФ имеют аварии техногенного характера: из 62,1 % общего количества 37,9 % приходится на коммунальные системы жизнеобеспечения – теплоэнергоснабжение, водоснабжение и канализацию. Значительная часть техногенных аварий произошла по причинам ветхости сетей и оборудования (45 %) и из-за нарушения правил технической эксплуатации (36 %). Для канализационных сооружений (согласно данным ГУП «Мосводоканал») статистика аварий за первое полугодие 2002 г. показана на рис. 1.5. Характерные для подземного строительства аварии приведены в табл. 1.3.



Рис. 1.5. Статистика аварий на канализационных сетях

Характерные аварии при подземном строительстве

Период	Вид аварии	Место аварии
Строительство	Обрушение породы в забое; разрушение и чрезмерные деформации крепи; прорывы воды и плывунов; загазованность и задымленность воздуха; пожары, загорания, взрывы; поломка горно-строительного оборудования (щиты, тоннеле-проходческие машины, буровые агрегаты и т.п.); столкновение или сход с рельсов вагонок и электровозов; повреждение временных инженерных коммуникаций (водопровод, электрокабели, трубопроводы сжатого воздуха) и оборудования (компрессоры, вентиляторы, насосы)	Призабойная зона; отдельные участки готового подземного сооружения
Эксплуатация	Обрушение породы; деформирование обделки; загазованность воздуха; пожары, взрывы; оледенение наружных конструкций; разрушение внутренних конструкций	Любой участок тоннеля

Таким образом, все подземные сооружения, независимо от их типа, при строительстве и эксплуатации воздействуют на массив, который служит для них основанием и вмещающей средой. Воздействие это выражается в передаче сжимающих, растягивающих, сдвигающих напряжений и деформаций; в изменении теплового и фильтрационного режимов и т.п.

В то же время на тоннель воздействуют геологические процессы, происходящие в естественных условиях в массиве (сейсмопроявления, карстообразование, гравитационные процессы, суффозия, выветривание и т.п.). Формируется *область взаимодействия подземного сооружения с массивом*, т.е. та часть породного массива, в пределах которой в периоды строительства и эксплуатации подземного сооружения происходят существенные изменения состава, состояния, свойств горных пород, и развиваются геологические процессы. Характер, интенсивность и скорость этих изменений зависят от геологического строения массива, развивающихся геологических процессов, типа подземного сооружения, технологии ведения горно-строительных работ, сроков строительства, режима эксплуатации объекта и климатических условий. За границы области принимаются пределы, за которыми означенные изменения не имеют практического значения.

Виды и характер воздействия подземных сооружений на вмещающий массив и городскую среду могут быть различными в зависимости от типа и назначения подземного сооружения, горно-технических и гидрогеологических условий его заложения, технологии ведения строительных работ, длительности эксплуатации тоннеля и т.п. Основным источником такого воздействия является особый характер проявления природных и техногенных факторов, обусловленный взаимодействием элементов в системе «массив – технология – сооружение». Так как подобное взаимодействие характеризуется, прежде всего, изменением напряженно-деформированного состояния массива, вмещающего подземный объект, и активизацией фильтрационных процессов, то они и служат первоисточниками экологического дисбаланса и негативного воздействия подземного строительства на окружающую среду.

1.3

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА С ПОЗИЦИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Перечислим возможные причины возникновения экологической опасности при применении существующих в настоящее время технологий строительства городских подземных сооружений.

1. *Ошибки при изысканиях, связанные с неполнотой или неадекватностью разведочных исследований.*

2. *Ошибки при выборе технологии ведения работ в данном районе.*

3. *Несовершенство горно-проходческой техники и технологии ведения работ.*

4. *Нарушение паспорта крепления забоя.* Отклонение крепления забоя от паспортных норм, особенно в зоне действия наземных нагрузок, может приводить к значительным обрушениям поверхности. Примером может служить ситуация в Улан-Удэ, когда при устройстве сопряжения канализационного тоннеля с шахтным стволом в галечниках произошло обрушение небрежно закрепленного забоя. Обрушение произошло вследствие динамических нагрузок, вызванных движением железнодорожного транспорта. При проходке коммунального тоннеля щитом диаметром 4 м под железнодорожными путями на станции Аксарайская-1 вследствие нарушения паспорта крепления забоя произошел провал земной поверхности с образованием воронки. В результате движение поездов было остановлено.

5. *Ошибки в выборе и определении необходимых конструктивных свойств обделок, их материала и способа гидроизоляции.*

6. *Нарушение технологических режимов и качества применения специальных способов строительства.* Потенциальную экологическую опасность создает строительство подземных сооружений специальными способами. Действующие подземные объекты могут представлять опасность при вымывании подземными водами, обтекающими контур сооружения, и последующей миграции вредных

компонентов из материалов гидроизоляции и химического укрепления грунтов. При этом опасность загрязнения усугубляется тем, что выделение токсических компонентов происходит постепенно и усиливается по мере «старения» сооружения.

7. *Недоучет взаимосвязи между инъекционным материалом, материалом обделок, составом грунтового массива и грунтовых вод, их агрессивностью и минерализацией*, при этом имеется в виду использование ранее неизвестных материалов для гидроизоляции и ремонта, которые не исследовались на предмет взаимодействия с характерным для данного района составом почв, пород, степенью минерализации и составом грунтовых вод. Примером является ситуация в районе станции метро «Полежаевская», где для ликвидации последствий аварии находящегося рядом коллекторного тоннеля в массив было закачено значительное количество карбамидной смолы. Отсутствие увязки сведений о составе агрессивных компонентов вод с материалом химического укрепления и с характером миграции подземных вод, содержащих сернистые соли, привело к достаточно быстрому расщеплению карбамидной смолы с образованием мочевины и формалина.

8. *Недоучет наличия близлежащих инженерных коммуникаций и плохой инженерный расчет зоны их влияния*. Например, прорывы в подземные сооружения в результате их подработки строящимися выработками могут возникнуть вследствие небрежного отношения к старым коммуникациям при строительстве новых подземных сооружений, недостаточности топографических исследований и неправильном выборе технологии ведения работ. Примером такой небрежности и непрофессионализма является авария в Самаре в 1980 г. В процессе проходки щитом (ПЩ-3,2) Главного Волжского тоннеля забоем был подработан вышерасположенный канализационный тоннель (расход канализационных стоков $3,5 \text{ м}^3/\text{с}$) постройки 1913 г. с обделкой из кирпича. Пройденный тоннель длиной 3 км был затоплен. На поверхности образовалась воронка диаметром более 30 м и глубиной более 13 м. В откосах воронки обнажились газопровод среднего давления диаметром 600 мм, кабели электроснабжения и связи. Потребовалось более двух недель на поиск и реализацию способов отвода стоков. В условиях сильных морозов удалось лишь пробить траншею в мерзлых грунтах через